من الذرة إلى الطاقة

د.جمال الدين نوح

تقديم

د.جلال مندور

الكتاب: من الذرة إلى الطاقة

الكاتب: د.جمال الدين نوح

تقديم : د.جلال مندور

الطبعة: **2018**

الناشر: وكالة الصحافة العربية (ناشرون)



5 ش عبد المنعم سالم – الوحدة العربية – مدكور- الهرم – الجيزة
جمهورية مصر العربية
هاتف : 35825293 – 35867576 – 35867575
فاكس : 35878373

http://www.apatop.com E-mail: news@apatop.com

دار الكتب المصرية
فهرسة إثناء النشر

نوح ، د.جمال الدين
من الذرة إلى الطاقة / د.جمال الدين نوح / تقديم : د.جلال مندور
– الجيزة – وكالة الصحافة العربية.
113 ص، **18** سم.
الترقيم الدولى: **4 – 623 – 446– 977– 978**
أ – العنوان رقم الإيداع : **25717 / 2018**

من الذرة إلى الطاقة





مقدمة

الذرّة هي أصغر جزء في هذا الكون، وهي لا تُرى بالعين المجردة، كما تُعتبر وحدة بناء الكون، فكُل العناصر الموجودة في هذا الكون تتكون من ذرات، كما يرجع أصل الكلمة الإنجليزية (**Atom**) إلى الكلمة الإغريقية أتوموس، والتي تعني الغير قابل للانقسام؛ إذ كان يُعتقد قديماً أنه ليس ثمة ما هو أصغر من الذرة.

تتكون الذرة من سحابة من الشُحنات السالبة (الإلكترونات) التي تدور حول نواة موجبة الشُحنة صغيرة جدًا في المركز، وتتكون النواة من بروتونات موجبة الشحنة، ونيوترونات مُتعادلة الشُحنة، وتُعتبر الذرة هي أصغر جُزء من العنصر يُمكن أن يتميز به عن بقية العناصر؛ إذ كُلما غصنا أكثر في المادة لوجدنا عناصر أصغر، ولن يعود هناك فرق بين عُنصر وآخر، فمثلاً لا فرق بين بروتون في ذرة حديد وبروتون آخر في ذرة يورانيوم مثلًا، أو ذرة أي عنصرٍ آخر.

فالذرة بما تحمله من خصائص عدد بروتوناتها، وكتلتها، وتوزيعها الإلكتروني تصنع الفروقات بين العناصر المُختلفة، وبين الصور المختلفة للعنصر نفسه (المسماة بالنظائر) وحتى بين كَون هذا العنصر قادراً على خوض تفاعلاً كيميائياً ما أم لا.

ظل وما زال تركيب الذرة وما يجري في هذا العالم البالغ الصغر يشغل العلماء ويدفعهم إلى اكتشاف المزيد والمزيد من خباياها؛ ومن هنا أخذت تظهر فروع جديدة في العلم حاملة معها مبادئها ونظرياتها الخاصة بها؛ وتُعبّر الطّاقة الذريّة، ويُطلق عليها أيضاً الطّاقة النوويّة أحد فروع الذرة التي ينتج عنها طاقة بكمياتٍ كبيرةٍ من خلال العمليّات التي تُؤثّر في نواة الذرّة، أو نوى الذرّات الكثيفة، كما تختلف الطّاقة الذرّية عن الطاقة الناتجة بفعل الظواهر الكيميائيّة الأخرى كالتفاعلات الكيميائيّة المختلفة والتي تتم عن طريق استخدام الإلكترونات التي توجد في مدارات الذرّة.

تُعتبر طريقة الانشطار النووي، إحدى الطرق المُستخدمة لإنتاج الطّاقة النووية، وتتميّز بأنّها خاضعة للرقابة وتتم في المفاعلات النووية التي تنتشر الآن في أجزاء عديدة حول العالم، كما توجد طريقة أخرى خاضعة للرقابة لإنتاج الطّاقة النووية وهي الاندماج النووي لكنّها لم تكتمل في أواخر الثمانينيات من القرن التاسع الميلاديّ، وبالتالي فإنّ الطرق المُستخدمة لإنتاج الطاقة النووية هي الاندماج النووي والانشطار النووي.

بُني أوّل مفاعل نووي خلال الحرب العالميّة الثانيّة ما بين عامي **1939**م : **1945** م كجزء من مشروع مانهاتن لبناء القنبلة الذريّة، وقد بُني تحت إشراف إنريكو فيرمي في غرفةٍ ضخمةٍ تحت ملاعب رياضة الأسكواش في جامعة شيكاغو، وكان عبارة عن الاختبار الملموس لأوّل

النظريات القائمة على الانشطار النووي. وبدأ تشغيل المفاعل النووي لأوّل مرّة في الثاني من شهر تشرين الأوّل في عام 1942م، واعتمد العلماء بشكلٍ كامل على الحسابات الرياضيّة لحساب استخدام طريقة الانشطار النووي لإنتاج الطّاقة، وقد أُعطيت فرصة كبيرة للعلماء اللذين بنوا المفاعل النووي الأوّل.

تكوّن المفاعل الأوّل باستخدام طبقات متتالية من عنصر اليورانيوم، وأكسيد اليورانيوم، والجرافيت كعنصر مُحرر، وقد بُنيت قضبان التحكّم من عنصر الكاديوم لتركيز النيترونات داخل المفاعل، وقد عُرفت وحدة الذرّات داخل المفاعل بوحدة الكومة ذريّة؛ وذلك لأنّ المفاعل قد بُني عن طريق وضع مواد فوق بعضها، وقد وجّه العالم فيرمي قضبان التحكّم لتُصبح معزولة في الثاني من شهر تشرين الأول في عام 1945م، ويُعتبر هذا التاريخ هو بداية عصر التحكّم بالطّاقة النووية في التاريخ البشريّ.

حالياً تُنتج محطّات الطّاقة النوويّة 11% من المخزون العالمي للكهرباء، حيث إنّ 80% من هذا المخزون يوجد في بلدان منظّمة التعاون والتنمية في الميدان الاقتصادي، وتُنتج هذه الطّاقة عن طريق الانشطاري النووي.

أحد الأشياء التي تنتج عن الطاقة النووية هو (النفايات المشعة)؛ و(النفايات المشعة) هي مواد مُتبقية من التفاعل النووي. وهذه المواد المُشِعَّة يمكن أن تُشكِّل خطراً على البشر والحياة الحيوانية.

الطاقة النووية لها استخدامات أخرى بالإضافة إلى محطات الطاقة؛ وأحد الاستخدامات هو الدفع النووي في السفن والغواصات حيث يُمكن للغواصات العمل بالطاقة النووية أن تبقى تحت الماء وتسافر بسرعات عالية لفترة طويلة؛ كما تم استخدام الطاقة النووية في السفن البحرية والسفن المُستخدمة لكسر الجليد في البحار القطبية، وسُفن الفضاء، وهُناك شكل آخر من أشكال الطاقة النووية ألا وهو الاندماج النووي، ويحدث الاندماج عندما تجتمع معاً: اثنتان أو أكثر من الذرات لخلق ذرة أكبر؛ فالنجوم تحصل على طاقتها من الاندماج النووي؛ ففي العُمق داخل النجم يجري باستمرار تحويل ذرات الهيدروجين إلى ذرات هيليوم عن طريق الاندماج؛ وهذه هي العملية التي تقوم بتوليد طاقة الضوء والحرارة المُنبعثة من النجوم، بما فيها الشمس.

ولم يتمكن العلماء من معرفة (كيفية السيطرة) على عملية الاندماج لصنع طاقة (قابلة للاستخدام)؛ وإذا كان ذلك مُمكناً فهذا سيكون نبأ عظيم، حيث أن عملية الاندماج تُنتِج مواد مُشِعَّة أقل، وسوف تُعطينا إمدادات غير محدودة تقريباً من الطاقة.

وهُناك الكثير من حقائق المُثيرة التي يجب أن تُلم بها حول مجال الطاقة النووية والانشطار النووي مثل ما يلي: –

* يُمكن لحبة صغيرة من مادة اليورانيوم أن تقوم بتوليد نفس الكمية من الطاقة التي يولدها حوالي **1000** كيلوجرام من الفحم.

* الدخان الذي تراه يخرج من محطة للطاقة النووية ليس (تلوثا)، ولكنه بخار للماء.

* كانت أول غواصة تعمل بالطاقة النووية اسمها (يو إس إس نوتيلوس) والتي تم وضعها في البحر في عام **1954** م.

* الولايات المتحدة الأمريكية تقوم بتوليد طاقة نووية أكثر من أي دولة أخرى في العالم.

* في تاريخ الطاقة النووية كانت هناك ثلاث كوارث كبرى حدثت في محطات للطاقة النووية وهي كارثة انفجار محطة تشيرنوبيل النووية (روسيا)، وكارثة ثري مايل آيلاند (الولايات المتحدة الأمريكية)، وكارثة محطة فوكوشيما (اليابان).

وكُل ما سبق ستجده مسطوراً بأحرف من نور في ذلك الكتاب الكنز الذي بين يديك والذي يحوي بين طياته خُلاصة التجارب العلمية التي قام بها عُلماء الذرة ليتوصلوا إلي إنتاج الطاقة من هذه الذرة الصغيرة التي لا يستطيعون رؤيتها بالعين المُجردة... فهيا بنا نستمتع بهذا الكتاب والإبحار في عالم الذرة الغريب والمُثير..

د. جلال مندور

الذرة:

ترجمة لكلمة إغريقية قديمة تؤدي معنى عدم الانقسام، وهي كلمة أتوم، عرّفها القدماء بأنها الجزء الذي لا ينقسم– واعتبروا الذرات كرات صغيرة مرنة ،وعرفوا منها أكثر من تسعين نوعاً تتكون منها جميع المواد–

ولكن هذا التعريف البسيط لم يعد صالحاً في الوقت الحاضر– فقد عُرفت حديثاً ظواهر لا تتفق مع هذا التعريف الذي يفترض وجود كرات صغيرة غير قابلة للانقسام تختلف في الحجم والوزن وربما في خواص المرونة، وهذه الاختلافات لا تعطينا مادة كافية لشرح التأثيرات الضوئية الكهربائية، فلنحطم هذه الذرة لنرى ما بداخلها، هذه هي الطريقة لمعرفة تركيبها– إذا استطعنا تحطيمها فقد نجحنا، وإلا بقيت الذرة لغزاً صعب الحل.

لنتصور أننا استطعنا اقتحام هذه الذرة وأننا نقوم برحلة إلى أعماقها لنتعرف إليها فماذا نرى؟

سوف نصطدم أول الأمر بالطبقة الخارجة للذرة، وهي الطبقة التي تحتوي على وحدات من الكهرباء تسمى بالإلكترونات، ورغم أن الكل يعرف الكهرباء ويعرف الإلكترون إلا أن التعريف المجرد لأيهما من أصعب الأمور وتلزم لشرحهما بعض الأمثلة، ولنأخذ البطاريات كمثل من أمثلة مصادر الكهرباء، ومن البطاريات المعروفة بطاريات السيارات،

وتحتوى على طرفين أحدهما أحمر اللون والآخر أسود، ويمكن أن نتبين الغرض من وضع هذين اللونين إذا حاولنا توصيل دائرة كهربائية تحتوى هذه البطارية– فإن الكهرباء الموجبة تسري من الطرف الأحمر إلى الطرف الأسود أو بعبارة أخرى الكهرباء السالبة تسري من الطرف الأسود إلى الطرف الأحمر أي في الاتجاه المضاد، ولو أن سلكاً وصل بين طرفي البطاريات الأحمر والأسود لظهرت شرارة كبيرة قد تُصهر السلك وتُسخنه لدرجة لا تحتملها يد الإنسان.

ومعنى هذا أننا افترضنا وجود نوعين من الكهرباء، نسميهما كهرباء موجبة وسالبة، وهذان النوعان من الكهرباء يمكن إثبات وجودهما بتجارب تشرح للطلبة في المدارس، التجارب التي تعتمد على قضبان الزجاج التي تدلك بالحرير وبالفرو، وسمّي نوعا الكهرباء بالموجبة والسالبة تسمية تدل بسهولة على أن لهما صفات مشتركة، فمثلاً الكهرباء الموجبة تجذب الكهرباء السالبة ويذكرنا هذا بقواعد الجبر المعروفة، فلو جمعنا +**10**،– **10** لأصبح الناتج صفراً، كذلك **10** وحدات من الكهرباء الموجبة، **10** وحدات من الكهرباء السالبة مجموعها صفر.

ومرور الكهرباء في سلك كهربائي يعبر عنه بالتيار الكهربائي، والتيار الكهربائي يُحدث بعض التأثيرات منها التأثير الحراري، ومنها الضوئي ومنها المغناطيسي والميكانيكي والكيميائي، ويُستخدم التيار الكهربائي في تسخين سلك داخل مصباح كهربي إلى درجة التوهج

فيضئ، ويستخدم في إدارة الموتورات بتأثيره المغناطيسي، ويستخدم في تحليل السوائل تحليلاً كيميائياً.

التحليل الكهربائي:

لنفرض أننا وضعنا محلولاً ضعيفاً من كبريتات النحاس الزرقاء في كأس زجاجي ثم وضعنا في المحلول لوحين من النحاس غير متصلين ببعضهما وإنما يتصلان بطرفي البطارية، فبعد مرور التيار مدةً من الزمن نجد أن أحد اللوحين قد زاد وزنه واللوح الآخر نقص وزنه، وأن النقص في أحدهما يساوي الزيادة في الآخر، ومعنى ذلك: أن التيار الكهربائي قد أزاح كمية من النحاس خلال المحلول من أحد اللوحين إلى الآخر حيث ترسب عليه، وتسمى هذه العملية بالتحليل الكهربي، وتستخدم هذه الطريقة في الصناعة في تحضير المعادن النقية وكذلك في طلاء المعادن.

والأمر الذي يهمنا في هذه العملية هو كيفية انتقال النحاس خلال المحلول، وهنا نلاحظ أن من شروط حدوث هذه العملية ألا يكون المحلول ماء نقياً، بل يلزم أن تذاب فيه كمية من مادة كيماوية، ومن الملاحظ أن كمية النحاس المترسبة على أحد اللوحين لم تأت من المحلول وإنما انتقلت إليه من اللوح الآخر؛ لأن درجة تركيز المحلول لم تتغير ،كما أن كمية المادة المترسبة تتناسب مع شدة التيار، فهي إذن تتناسب مع كمية الكهربية التي تسري داخل الإناء الزجاجي.

أليس معنى هذا أن ذرات النحاس المنتقلة في المحلول تحتوي على كمية معينة من الكهرباء؟ أى أن كل ذرة من النحاس تترسب على لوح النحاس؛ تكون قد حملت معها عدداً ثابتاً من وحدات الكهرباء.

هذا الرأى قد تم الوصول إليه تفصيلاً ويعد أساساً لتفسير ما عرف عن التحليل الكهربي والتوصيل الكهربي.

وتسمى الذّرات المشحونة بالكهرباء بالأيونات وكمية الكهرباء التي يحتويها جرام من الأيدروجين تسمى(الفاراداي)، وهذا هو اسم العالم الذي اكتشف قوانين التحليل الكهربي والفاراداي هو شحنة أيونات الأيدروجين في وحدة الكتلة أو الشحنة النوعية في جرام الأيدروجين الذي يحتوي على عدد من الذرات يساوى 6×10^{23} .

أشعة المهبط:

وإن كان هذا الاتجاه في التفكير يلقي ضوءاً على أصل الكهرباء، إلا أن البحث في الأشعة التي تخرج من الطرف المتصل بالقطب السالب عند مرور التيار في أنبوبة زجاجية بها غاز مخلخل يفيد في شرح الموضوع، وهذه الأشعة تسمى (أشعة المهبط) وتحمل كهرباء سالبة، وقد أمكن تعجيل هذه الأشعة وتقصيرها وجعلها تنحرف عن مساراتها.

وقد أمكن قياس الشحنة النوعية لأشعة المهبط وبمقارنتها بالشحنة النوعية لأيونات الأيدروجين وجد أنها تكبرها بمقدار **1840**.

ولما كانت الشحنة النوعية: هي النسبة بين الشحنة والكتلة فإننا نستنتج من ذلك أحد أمرين، إما أن شحنة أشعة المهبط أكبر من شحنة أيون الأيدروجين أو وزن أيون الأيدروجين أكبر من وزن أشعة المهبط، وأن مقدار الشحنة واحد في الحالتين، إلا أنه ثبت أن شحنة أشعة المهبط سالبة حيث أنها تنبعث من القطب السالب ،وقد تحقق العلماء من ذلك بإجراء تجارب على هذه الأشعة وثبت أن مادة الراديوم تنبعث منها إشاعات متشابهة، وتسمى أشعة (البيتا)، ولها نفس خواص أشعة المهبط.

الكتلة تتغير مع السرعة

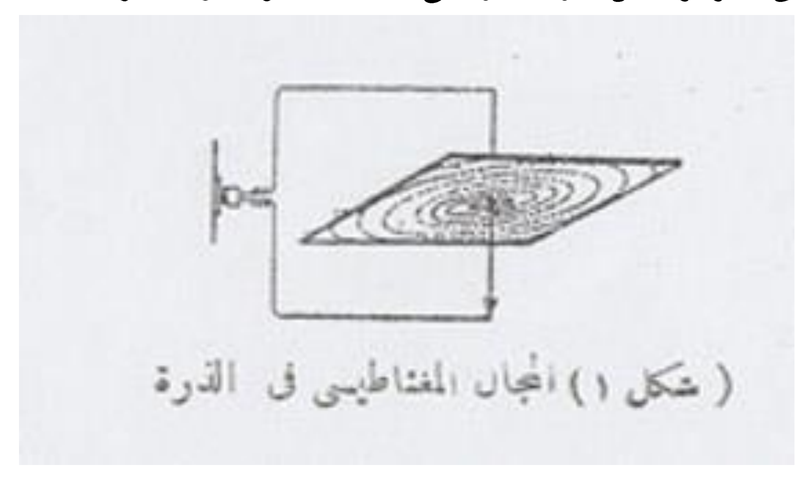
وعند قياس سرعة هذه الجسيمات ؛نجد أن الشحنة النوعية تتغير مع السرعة، فتزيد إذا نقصت السرعة، وتنقص إذا زادت السرعة،

وليس معقولاً أن تتغير الشحنة مع السرعة ولذا لزم أن نتصور أن الكتلة تتغير مع السرعة ؛حيث أن الكتلة هي الشئ الذي يقاوم العجلة، ويجب أن تزداد إذا ازدادت السرعة.. والنتيجة غريبة وقد ثبت صحتها، وثبت بالتجربة أن الكتلة تزداد بزيادة السرعة وأن هناك علاقة رياضية تنظم هذه الزيادة.

المجال المغناطيسي في الذرة:

وبنظرة عالم الطبيعة الفاحصة، وجد أن بالذّرة مجالاً مغناطيسياً يتكون فيها عندما تبدأ الحركة، والكثير منا يعرف تجربة (برادة الحديد) التي توضع على قطعة من الورق فوق قضيب مغناطيسي، فتتفرق البرادة في شكل منتظم وترتب نفسها في خطوط، تسمى (خطوط القوى) ؛مما يبين كيفية توزيع القوى المغناطيسية مقداراً واتجاهاً فسير هذه الخطوط قريبة بعضها من بعض دلالة على قوتها، وعندما تسير متباعدة تدل على أنها ضعيفة، ويمكن ملاحظة تكون مجال مغناطيسي حول سلك يحمل تياراً كهربيّاً (شكل 1) وقد كان هذا اكتشافاً عظيماً للعالم (أويرستد) الذي اكتشف

أن كل تيار كهربائي يصحبه مجال مغناطيسي ،وهذا المجال المغناطيسي يمثل طاقة مختزنة فإذا زاد التيار زاد في الطاقة المغناطيسية المختزنة، هذه الطاقة لم تتحول إلى حرارة كما يحدث عند مرور تيار في سلك ذي مقاومة لتغير التيار الكهربائي، وأن هذه الطاقة صغيرة إذا كان السلك مستقيماً، ولكن السلك لو كان على هيئة ملف بحيث تمر كل لفة في خطوط القوى المغناطيسية للفات المجاورة؛ فإنّ مقاومة كبيرة لتغير التيار تتكون ونسميها بالحث المغناطيسي، وكل منا لا شك يتبين وجود الكثير من هذه الملفات إذا تطلع إلى تفاصيل جهاز اللاسلكي، وهذه الملفات بمعنى آخر تزيد من قدرة التيار على الاحتفاظ بقوته دون تغيير.

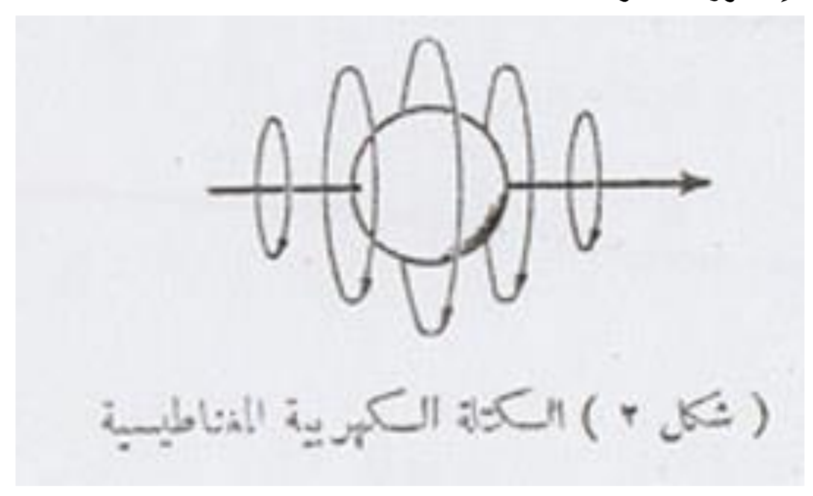


(شكل ١) المجال المغناطيسى فى الذرة

الكتلة الكهربائية المغناطيسية:

لنتصور أن كرة مشحونة بالكهرباء تحركت ،فهذه الكرة المتحركة تصبح كأنها تيار كهربائي يحيط به مجال مغناطيسي (شكل 2)، فإذا زادت

السرعة زاد المجال المغناطيسي، وإذا قلت قل المجال المغناطيسي، ويبدو كأنّ الكرة بهذه السرعة تزداد وزناً، فإذا لم تكن الكرة مشحونة لم يحدث ذلك، ولذا تظهر لدينا بهذه الفكرة كتلة إضافية نسميها الكتلة الكهربائية المغناطيسية. وهذه الكتلة الإَضافية تزداد بزيادة السرعة كما يلاحظ في حالة أشعة (بيتا) أو (أشعة المهبط السريعة). وقد دعا صغر كتلة الإلكترون العلماء أن يفكروا في اعتبار كتلة الإلكترون كلها كتلة كهربائية مغناطيسية، ولو أن الذرة مكونة من إلكترونات لفكرنا في اعتبارها ظاهرة كهربائية مغناطيسية، ولكن قوانين تغير الكتلة مع السرعة؛ لا تتفق مع التجارب ،علاوة على أن النظرية لم تكن كاملة فكيف توزع الكرات الإلكترونية وكيف توزع الشحنة؟، هل هي على السطح أم موزعة في الداخل.. لما كان من المعروف أنه كلما كان قطر الكرة صغيراً كانت الكتلة الكهربائية المغناطيسية كبيرة، إذن فإلكترون لا يمكن أن يكون نقطة إذ في هذه الحالة تصبح كتلة لا نهائية بينما كتلة الإلكترون صغيرة جداً.


(شكل ٢) الكتلة الكهربية المغناطيسية

الكتلة والطاقة:

كل هذه الصعوبات أدت إلى رفض هذه الفكرة، وسرعان ما شرح (أينشتاين) "النظرية النسبية" ليفسر بها هذا الموضوع، واستنتج أن الكتلة والطاقة كميتان قابلتان للتحويل إحداهما للأخرى؛ بمعنى أن كتلة من المادة قدرها (ك) يمكن أن تتحول إلى طاقة قدرها (ك جـ2) حيث "جـ" كمية ثابتة تساوي سرعة الضوء وهذا التعريف يحل كثيراً من الاعتراضات الموجهة إلى اعتبار الإلكترون كتلة كهربائية مغناطيسية، فالإلكترون بصفته جسيم مشحون يحمل طاقة كهربائية، وما من شك في أن كتلة الإلكترون يمكن أن تكون مقابلة لطاقته الكهربائية ولأجل شحن كرة من المادة، يجب أن تبذل شغلاً يقدر بمربع الشحنة مقسوماً على نصف قطر الكرة، وهذا الشغل هو الطاقة الكهربائية على الكرة.

وإذا اعتبرنا أن هذا ينطبق على الإلكترون، وطبقنا نظرية أنيشتين فإننا نجد أن

$$\frac{\text{ش}^2}{\text{نق}} \qquad \text{ك جـ}^2$$

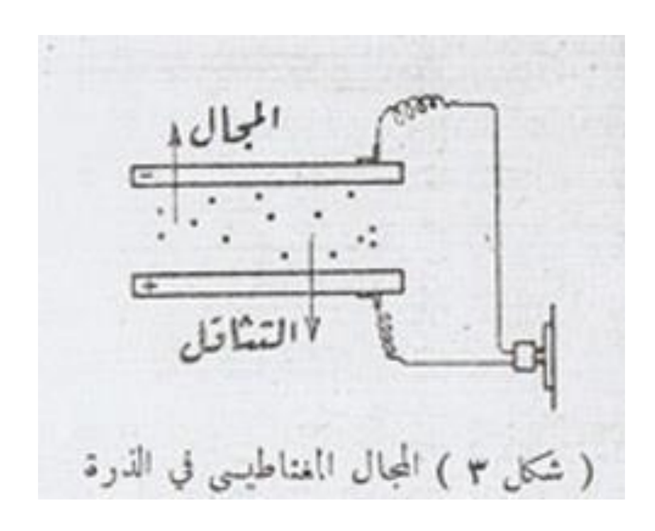
حيث(ش) شحنة الإلكترون و(نق) نصف قطر الإلكترون و(ك)كتلته و(جـ) سرعة الضوء ومن هنا نستطيع أن نقدر قيمة نصف قطر الإلكترون من العلاقة.

$$\text{ق} \qquad \frac{\text{ش}^2}{\text{ك جـ}^3} \qquad 10^{-13} \text{ سم تقريباً}$$

تعيين شحنة الإلكترون:

ما قيمة شحنة الإلكترون بعد أن عرفنا النسبة بين شحنته ووزنه؟ يمكن الحصول على قيمة تقريبية لشحنة الإلكترون لو قسمنا شحنة معروفة مثل (الفرادای) على عدد ما تحتويه من إلكترونات و(الفرادای): شحنة معروفة ويحتوى على عدد ثابت من الإلكترونات مقداره 6×10^{23} – خارج القسمة فيعطينا قيمة تقريبية لشحنة الإلكترون؛ لأن عدد الإلكترونات هذا عدد تقريبي، فلابد من البحث عن طريقة أخرى ،لابد من البحث عن ميزان نزن به الشحنة كما نزن الكتلة بالميزان المعتاد لابد من البحث عن ميزان إلكتروني حساس.

لنتصور قطرات صغيرة جدّاً من الزيت سابح بين لوحين من المعدن، هذه القطرات تتساقط بين اللوحين تحت تأثير التثاقل، لو أن اللوحين غير مشحونين بالكهرباء، فلو أننا شحنا اللوح الأسفل بشحنة موجبة والأعلى بشحنة سالبة (شكل 3).



(شكل ٣) المجال المغناطيسي في الذرة

لوجدنا أن قطرة الزيت ؛إذا كانت هي الأخرى مشحونة بشحنة سالبة أو موجبة، تتأثر بقوتين قوة جذب الأرض لها (التثاقل) وقوة كهربية أخرى ناشئة من المجال الكهربي بين اللوحين، ولنفرض أن مصدراً مشعاً وضع بالقرب من قطرات الزيت هذه ؛فإن أشعة بيتا أو الإلكترونات الناتجة تستطيع أن تؤين قطرات الزيت فنفصل منها الإلكترونات ذات الشحنة السالبة التي تتساقط إلى أسفل، وتبقى أيونات الزيت ذات الشحنة الموجبة المساوية لشحنة الإلكترونات متأثرة بقوة جذب الأرض والمجال الكهربي إلى أعلى، فإذا أضيئت المسافة بين اللوحين ؛فإن قطرات الزيت تظهر أمام "الميكروسكوب" كما لو كانت ثابتة ؛لو أن ثقلها يتساوى مع القوة المؤثرة عليها إلى أعلى، ويمكن أن تغير المجال الكهربي، حتى تصل إلى هذه الحالة التي تثبت فيها القطرات وعندئذ يكون

وزن القطرة= شحنتها× شدة المجال

ومن معلومية وزن القطرة وشدة المجال ،يمكن تعيين الشحنة .وعندما أجريت هذه التجربة ؛أمكن الحصول على قيم مختلفة للشحنة ش أ، 2 ش أ، 3 ش..... ولكن لم يتسن الحصول على قيمة أقل من ش ولذا احتسبت ش شحنة الإلكترون ومن هنا أمكن تعيين $\frac{ش}{ك}$ كتلة الإلكترون بمعلومية الشحنة ش والشحنة النوعية وقد وجد أن وزن الالكترون= 10^{-24} ميلليجرام

الإلكترون داخل في تركيب المادة:

لنرجع البصر قليلاً لنرى كيف حصلنا على الإلكترون من أشعة المهبط ،هذه الأشعة التي خرجت من مادة المهبط، ومعنى ذلك :أن المعدن الذي خرجت منه الأشعة مكون من الإلكترونات، وأن هذه الإلكترونات في المعادن ،هي السبب في أنها موصلة جيدة للكهرباء، ولكن إتضح أيضاً أنه من الممكن الحصول على الإلكترونات من الغازات؛ فإذا مر تيار كهربائي في أنبوبة تحتوي على كمية من الغاز تحت ضغط منخفض ،فإن هذا التيار يسري من طرف الأنبوبة إلى الطرف الآخر بواسطة الإلكترونات الحرة المكونة في الغاز، والسرعة كبيرة جداً لدرجة أن ذرات الغاز تصبح مضيئة.

ويلاحظ هذا كثيراً في إعلانات النيون والأرجون ،وفي كثير من الحالات تلتقف الإلكترونات الخارجة من الذرات بواسطة ذرات أخرى وتعطي أيونات سالبة.

أمواج وجسيمات وكم

من نحو أربعين عاماً ،والتجارب على تركيب الذرة يجريها العلماء في المعامل، وقد وصلت هذه التجارب إلى تحقيق نماذج للذرة، ومن دراسة الطيف ؛أمكن تخيل وجود سحب الإلكترون وفي مدة وجيزة تغيرت فكرة العالم عن تركيب المادة،

فعرفت نماذج (رذوفور، وبوهر) للذرة وثبت أنها نماذج صحيحة، ولكن ككل إضافة للمعرفة يقوم بها أحد العلماء، لا تزال تملأ الفراغات الموجودة حولها؛ إلى أن تتراكم عناصر المعرفة، ويتكامل الموضوع بعد أن يكون قد اشترك فيه علماء كثيرون، في أزمنة مختلفة، فقد تمكن (كوبر نيكس ،وجاليليو، وكبلر) من تبيان ملاحظتهم بشأن نموذج المجموعة الشمسية، وكيفية حركة الكواكب في مداراتها حول المركز الكبير ،ولكنهم لم يبينوا لماذا؟ إلى أن أتى نيوتن ،ووضح السبب ،حين ربط هذه الحركة بفعل قوة الجاذبية، وهنا اكتمل المعنى عن نموذج كوبرينكس وأصبح مفهوماً.

نظرية ماكس بلانك:

ومنذ نحو ستين سنة حاول العالم الألماني ماكس بلانك أن يصف ظاهرة انبعاث الإشعاعات من المواد المشعة بواسطة قانون عام ،فوصل إلى حقيقة غريبة، وأعلن أنه عثر على قانون يستنتج منه أن الطاقة لا تنبعث

على هيئة سيل مستمر، ولكن على دفعات غير قابلة للتجزئة سميت بالكم فبين أن أشعة الشمس نفسها مثلها كمثل أي أشعة أخرى صادرة من مصدر مشع، تتكون من دفعات من الطاقة صغيرة ،وأن السبب في أن الضوء والحرارة تظهر لنا كما لو كانت سيلا مستمراً؛ هو صغر هذه الكميات من الطاقة ،بحيث أن إحساسنا لا يستطيع التمييز بينها، وبين بلانك أن كميات الطاقة الصغيرة هذه ليست متساوية، ولكنها تختلف باختلاف طول الموجة المشعة فكميات الطاقة المنبعثة من الضوء الأحمر أصغر من المنبعثة من الأزرق والبنفسجي، والكميات المنبعثة من الضوء الأزرق ،أصغر من المنبعثة من أشعة رزنتجن ،وقد حققت التجارب نظرية بلانك، تحقيقاً سبب لها النجاح المطرد، كما حققت مكاسب علمية كبيرة في القرن العشرين.

فإذا عبرنا عن تردد الإشعاع أو الضوء بالرمز "ت"، وعن الطاقة المنبعثة بالرمز "ق" فإن ق= هـ×ت حيث هـ كمية ثابتة ،أوجدها "ماكس بلانك" وتسمى ثابت(بلانك)، وهي كمية صغيرة تقاس بالأرج ويعبر عن التردد؛ بأنه عدد الذبذبات في الثانية. وثابت ماكس بلانك= 6.5×10^{-27} إرج ثانية[1]– ولما كان الضوء العادي يتذبذب بمقدار 6×10^{14} مرة في الثانية، فإن الطاقة المنبعثة منه تساوى هـ×ت=4×10^{-12} إرجا وهذه كمية صغيرة جداً.

---

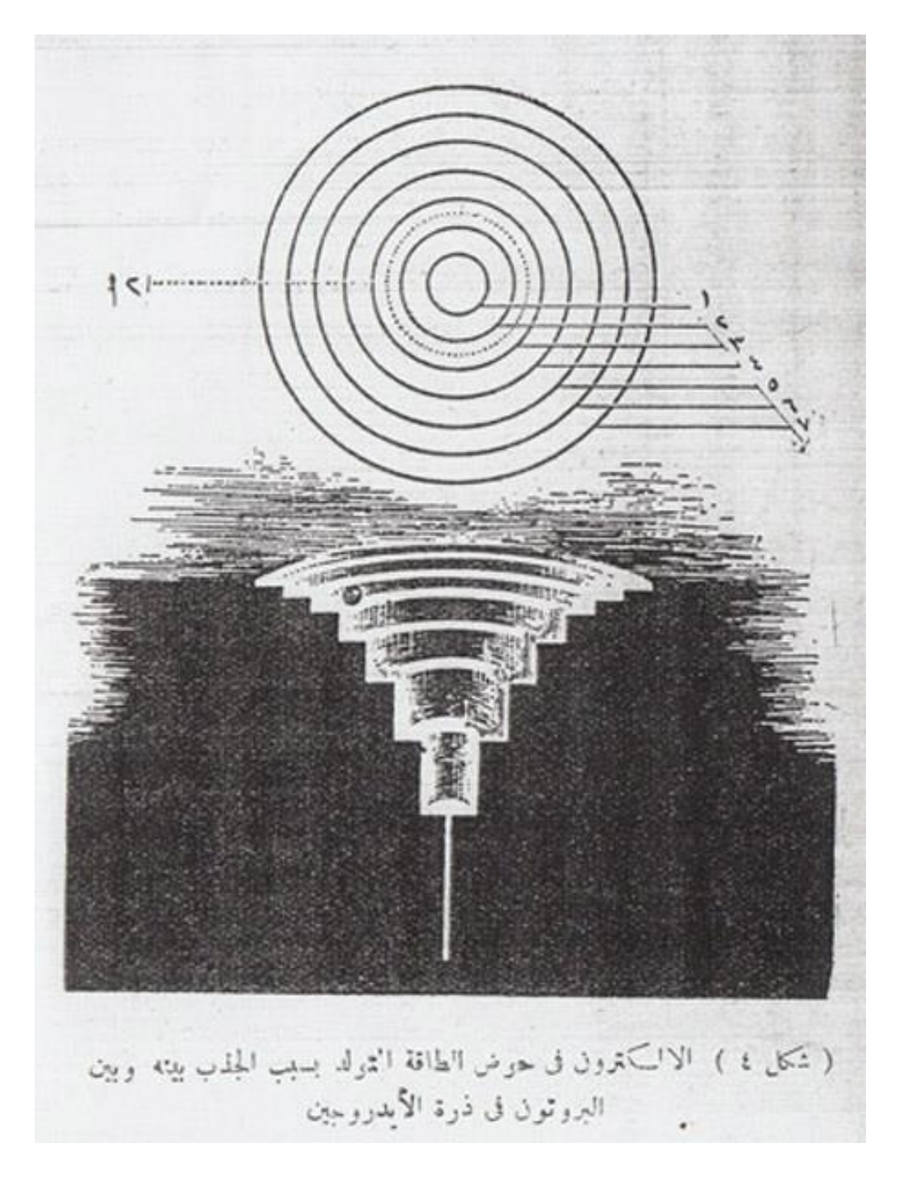
[1] الارج يعدد بالشغل المبذول لتحريك كتلة قدرها نحو ملليجرام واحد من المادة مسافة قدرها سنتيمتر واحد ضد الجاذبية الأرضية. الشغل بالارج= القوة بالزمن× المسافة بالسنتيمتر.

هذا القانون الحسابي البسيط لم يكن أيضاً في علم الطبيعة وحده، بل أصبح مفيداً أيضاً في علم الحياة (البيولوجي) ،فمن المعروف أن كساح الأطفال ينشأ عن نقص في فيتامين د، وقد عرف أيضاً أن هذه المادة يمكن أن تتكون في جسم الإنسان بتأثير أشعة الشمس، والتفاعل الكيماوى يحتاج إلى طاقة كبيرة وهذه الطاقة الكبيرة يمكن الحصول عليها من أكثر أنواع الضوء تردداً؛ وهي الأشعة فوق البنفسجية، ولذا عرف أن أشعة الشمس التي تمر في نافذة زجاجية تحجز الأشعة فوق البنفسجية، لا تساعد على علاج الكساح ؛بل يكفي مصباح صغير يولد أشعة فوق البنفسجية لتأدية هذا الغرض.

نظرية بوهر:

وقد ربط "بوهر" بين نظرية الكم هذه ومعلومات الإنسان عن خواص المادة ،فقد كان من المعروف أن ذرات الغازات الساخنة ينبعث منها ضوء ذو موجات معلومة الطول، فمثلاً إذا وضعت ذرات من ملح الطعام في لهب مشتعل، فإنها تعطي لوناً أصفر، لأن ذرات الصوديوم تنبعث منها طاقة بكميات ذات حجم واحد ،تقابل طول موجة اللون الأَصفر، وكان شرح "بوهر" لهذه الظاهرة هو في شرح المدارات التي توجد بها الإلكترونات حول نواة الذرة، فمثلاً إذا تصادمت ذرة مع أخرى كما يحدث في الغازات الساخنة فإن إلكتروناً من الإلكترونات السابحة في المدار الخارجي، يمكن أن يندفع إلى مدار ذي قطر أكبر من قطر المدار الذي كان يحتله، ولا يلبث هذا الإلكترون أن يحاول العودة

إلى مداره القديم الذي كان يمثله بوذا تنبعث عنه كمية من الطاقة على شكل ضوء، ولما كان الضوء المنبعث من هذه العملية ذا موجة ثابتة الطلو، فإن كمية الطاقة المنبعثة أيضاً ثابتة مما يجعلنا نعتقد أن الإلكترون عندما يندفع من مداره إلى مدار أكبر لا يفعل ذلك ،دون قانون بل ينتقل إلى مدار آخر معروف محدد ثابت القطر وليس إلى أي مدار اختياري، فلنفرض مثلاً ذرة بسيطة مثل ذرة الأيدروجين ليس بها إلا إلكترون واحد فيمكن أن يندفع الإلكترون من مداره 1 إلى المدارات المحددة 2، 3، 4 انظر شكل (4) كما يمكن أن يعود إلى مدار أقرب ،ولا يمكن أن يعود إلى مدار غير محدد مثل المدار 2 ،أو هذه المدارات محددة بقانون "ماكس بلانك" وهذا اختلاف كبير عن حالة دوران الأرض حول الشمس أو دوران الأقمار الصناعية حول الأرض، فإذا زادت سرعة وطاقة الأرض أو القمر؛ فإنها تتخذ لنفسها مداراً أكبر، وإذا قلت إتخذت لنفسها مدار أصغر ،وهكذا فيمكن أن تتخذ الأرض أي وضع في حوض الجاذبية، كما يمكن أن تتخذ لنفسها أي مدار، بينما الإلكترونات محدودة بمدارات ثابتة ،فلابد من خطوات معينة وإذا لم يحصل الإلكترون على كمية الطاقة اللازمة لنقله من مدار إلى المدار الذي يليه فلا ينتقل ،أما إذا حصل على كمية من الطاقة تكفى لنقله فإنه ينتقل، وإذا عاد انبعث منه ضوء ذو طاقة تعادل الطاقة التي استطاعت نقله من مدار إلى آخر، كما لو كان يصعد ساماً أو يهبط ،فلا يستطيع الوقوف بين درجين من درج السلم.



(شكل ٤) الالكترون فى حوض الطاقة المتولد بسبب الجذب بينه وبين البروتون فى ذرة الأيدروجين

ولقد شابه اكتشاف "بوهر" لصورة الذرة اكتشاف كوبرينكس فقد شرح بوهر كيف أن الإلكترونات تتحرك داخل الذرة، وشرح القواعد التي تسير عليها وتضمن نموذج" بوهر" نظرية "بلانك" للكم،

ولكن هذه النظرية بنيت على تحليل الحقائق التي حققتها التجارب ،ومع ذلك فإن بعض ظواهر لا تتفق مع ما كنا نعرفه ذاك الوقت من قوانين الطبيعة الكلاسيكية ،ظلت تداعب هذا النموذج المبتكر طول الوقت وكان "بوهر" نفسه يراها بوضوح أكثر من غيره فالإلكترونات التي تسير في مداراتها يجب –حسب هذه القوانين– أن تبعث إشعاعات طول الوقت ،بينما هي لا تفعل ذلك ،وانبعاث الضوء يأتي بناء على قفزات من مدار إلى آخر حسب ما بينه "بوهر"، وما لبثت نظرية الكم هذه أن زعزعت قليلاً مركز ما نسميه في الوقت الحاضر ب "الطبيعة الكلاسيكية" وهي ما كنا نعرفه من علم الطبيعة في ذلك الوقت، وبسرعة كانت الخطوة الأولى للقوانين الجديدة عن الكم.

وقد وجد رجال الطبيعة أنفسهم أمام مجموعة من قوانين الطبيعة الجديدة التي احتلت فيها نظرية الكم مركزاً ممتازاً، كما اتضح أن التفسيرات التي وضعها "بوهر" كانت من لوازم هذه القوانين ويعني ذلك أنه وجب البحث عن مكان الخطأ في الطبيعة الكلاسيكية، وبالبحث وجد أن الطبيعة الكلاسيكية استطاعت تفسير القوانين عامة إلا إذا صغرت دنيا البحث؛ بحيث وصلت إلى أبعاد الذرة ،وهنا تحقق الطبيعة الكلاسيكية في تفسير ما نراه من ظواهر.

الطبيعة الكلاسيكية عند الأبعاد الكبيرة:

وفي نفس الوقت الذي هددت فيه الطبيعة الكلاسيكية بواسطة نظرية الكم، ظهر تهديد آخر فبيّن أنيشتين في النظرية النسبية أن قوانين نيوتن

في الميكانيكا ،التي كانت تشرح لنا ما يدور في حياتنا العادية ،أصبحت هي الأخرى غير ذات موضوع، عندما تزداد السرعة تكون أبعاد محيطنا كبيرة. أوضح أينشتين أن قوانين الميكانيكا ،بنيت على ملاحظات في دنيا الأبعاد التي يحسها الإنسان، وفي حركات بطيئة نسبياً ؛بحيث يمكن إدراكها بحواسنا ،وعندما تطبق قوانين أينشتين على هذه السرعة والأبعاد فإنها تتفق مع قوانين نيوتن.

ماكسويل وطيف الضوء:

وفي دنيا الذرة أيضاً عامل رجال الطبيعة الذرات والإلكترونات كما لو كانت قطعاً من المادة مثلها مثل المادة التي نقابلها في حياتنا العادية، كما نظر إلى الضوء كأنه تموجات على سطح بحيرة، ولا زالت النظرة إلى طبيعة الضوء هي نظرة ماكسويل ،حينما قال إنه موجات كهربائية مغناطيسية ،ولا زال الإنسان عاجزاً عن أن يحس أو يذوق أو يسمع أو يشم المجال الكهربائي المغناطيسي، ولا زالت في ذهنه تلك الموجات على سطح الماء كشبيه لموجات الضوء.

الكم والطبيعة الكلاسيكية:

وقد أصبح من الممكن أن يتجرد الإنسان من القيود الفكرية، التي تنشأ إذا حبس نفسه داخل الأبعاد التي يحسها فقط، ولزم أن يصمم نموذجاً للعمليات التي تحدث في نطاق الأبعاد الذرية ،مثل: نموذج المجموعة الشمسية التي فكر فيها "بوهر" و"رذرفورد" ومع هذا فالإلكترونات

ليست كرات ،أو كواكب ولذا ليس غريباً أن تشذ معاملتها هذه المعاملة ،ولكن لابد من فهم الأوضاع الجديدة ،وتقريبها إلى الذهن ،وفي بعض الأحيان نستعين بالرياضة على فهم المقاييس الجديدة ،وفي البعض الآخر نرى أننا دخلنا في المملكة الرياضية ؛لتفسير ظاهرة معينة، حتى إذا أردنا الخروج منها تعذر علينا ذلك ،وبقينا محبوسين فيها لأننا نجد أن خروجنا من هذه الدائرة معناه زيادة الغموض.

فموجات الضوء في الطبيعة الكلاسيكية تعتبر تموجات كهربية مغناطيسية: تنبعث في الفضاء وتضعف رويداً رويداً، كلما إتسع مداها في الفضاء ،فلنحاول تطبيق نظرية الكم أو نظرية "بلانك" التي تفترض وجوب انبعاث الطاقة على دفعات في حالتين. في الحالة الأولى: نضع حاجزاً محدود المساحة أمام مصدر ضوئي ؛فنجد أن كمية الضوء التي يستقبلها الحاجز تقل كلما ابتعد الحاجز عن المصدر الضوئي، وتظل تقل هذه الكمية بالتدريج إلى أن يصل الحاجز إلى وضع يستقبل فيه دفعة واحدة، أو كمًّا من الضوء في وقت معين، ونفرض أن هذا الكم ينتشر انتشاراً متساوياً على الحاجز، وفي الحالة الثانية نحاول بيان تأثير موجات الضوء على سطح معدن ،فنجد أن إلكتروناً ينبعث من سطح معدن ،كما يحدث في الخلية الضوئية والواضح أنه يلزم أن يكون الكم مركزاً على الإلكترون ،ومن الصعب توقع انبعاث الإلكترون إذا تصورنا أن الكم موزع على جزء من السطح؛ مما ينتج عنه أن الخلية الضوئية لا تؤدى عملها في الضوء الضعيف ،في حين أن المعروف أن الخلية الضوئية تؤدى عملها في الضوء الضعيف، ومن ذلك يلزم أن نستخلص من هذا أن

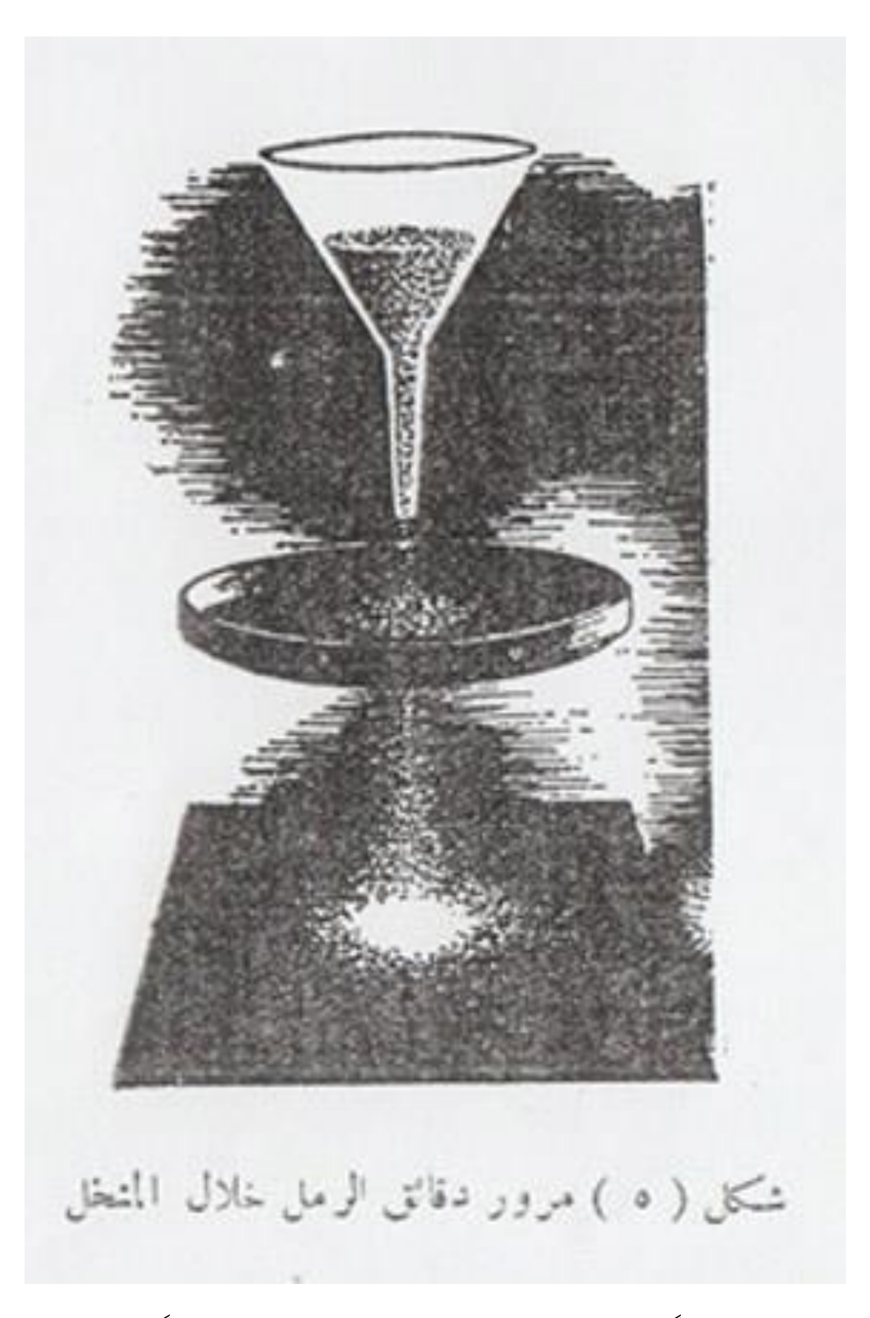
الكم لا ينتشر على الحاجز، إذا تحرك بعيداً في الفضاء ،ويجب أن نعتبر أن الضوء يتكون من مجموعة من دفعات الطاقة ،تسلك مسلك الجسيمات العادية من حيث الحجم ،فلا تتلاشى في الفضاء وسميت هذه الجسيمات بالفوتونات.

طبيعة الضوء:

وبذا نصبح في مأزق: أين نحن من طبيعة الضوء؟ هل هو أمواج أم جسيمات؟ هذا هو نفس السؤال الذي حير العلماء في عصر نيوتن، لدرجة أنه أقيمت حلقات علمية كثيرة، بعضها ينصر نظرية الأمواج ،وبعضها ينصر نظرية الجسيمات، حتى لقد قيل على سبيل التفكه ثلاثة أيام في الأسبوع للأمواج،وثلاثة للجسيمات ،ويوم للراحة ،ولما صعب على العلماء تخطئة إحدى النظريتين توقعوا علاقة أكثر غرابة، وتساءل المتسائلون: ماذا يكون الرأى في سلوك الجسيمات نفسها ؟أليس من الممكن أن تكون لها أيضاً خاصة موجبة؟ ولم ينتظر العلماء كثيراً ففي سنة **1924** تمكن "دى برولي" من نشر نظرية من شأنها أن تصحب الجسيمات المتحركة من المادة أمواج، سميت" أمواج المادة" ولكن المعنى الطبيعي وراء هذه التسمية ظل غامضاً ،ورغم هذا الغموض عد هذا الاكتشاف نصراً كبيراً للطبيعة الحديثة.

التجارب العملية لتحقيق اكتشاف دي برولي:

وبعد ذلك بسنوات ثلاث ،أجريت تجارب لإثبات هذه النظرية قام بهذه التجارب عالمان أمريكيان هما: "دافيسون" و"جرمر" وعالم إنجليزي هو السير "جورج تومسون" واعتمدت هذه التجارب أساساً على انتشار الإلكترونات في زوايا مختلفة نتيجة لاصطدامها بسطح بللورة من المعدن، ولتقريب التجربة إلى الأذهان، تشبه هذه الظاهرة بما يحدث لو :أن سيلا من حبيبات الرمل يخرج من ثقوب منخل ،دون المساس بالشبكة، وبعض الحبيبات تصطدم بالشبكة ،وترتد ثم تنتشر، ويعتمد مقدار الانتشار على حجم الحبيبات والثقوب، إلا أن منظر الحبيبات بعد مرورها في الثقوب لا يتغير بتغير حجم الثقوب ،ولو أن زاوية الانتشار تكبر، كلما صغرت ثقوب الشبكة فأغلب الحبيبات تمر في الوسط، في اتجاه المسار الأصلي تقريباً كما في (شكل 5) وإذا وضعت قطعة سوداء من القماش مكان سقوط الحبيبات، فإن الحبيبات تلتصق بالقماش في مكان سقوطها ،وتكون نتيجة التجربة تكون بقعة من الرمل، ملتصقة بالقماش تكون سميكة في المركز، وترق كلما بعدت عن المركز بالتدريج ،وهذه هي الصورة التي نتوقعها من مرور حبيبات الرمل خلال ثقوب المنخل، حسب معلوماتنا في الطبيعة الكلاسيكية- تقابل هذه التجربة "تجربة" أخرى تختص بمسير الضوء، الذي ينبعث من مصباح إضاءة في أحد الشوارع ،ويمر خلال من القماش ويلزم لإجراء التجربة أن يكون المصباح بعيداً.



شكل (٥) مرور دقائق الرمل خلال المنخل

يلاحظ أنه بدلاً من الحصول على بقعة بيضاء تضعف تدريجاً عند الابتعاد عن المركز، فإن شكلاً منتظماً يتكون يحتوى على مناطق مضيئة يفصلها

خطوط سوداء (شكل **6**)، والسبب في ذلك انتشار أمواج الضوء بواسطة خيوط القماش- واختلاف الصورة في الحالتين، ناتج من أننا اعتبرنا في الحالة الأولى حبيبات، وفي الحالة الثانية أمواجاً،

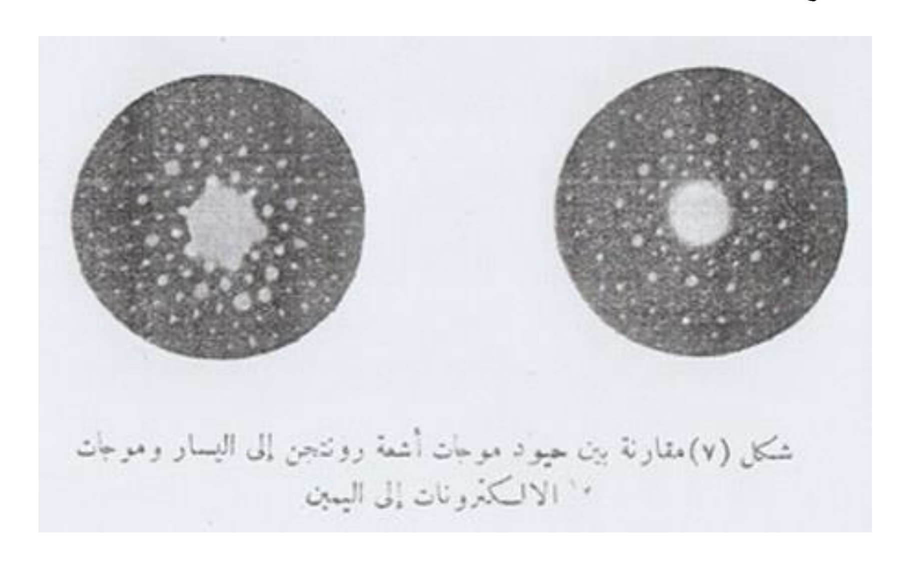


(شكل ٦) مرور أمواج الضوء خلال قماش المظلة

وأن تداخل الأمواج بعضها في بعض ليس أمراً بسيطاً، فإذا تداخلت موجتان، فإن نتيجة هذا التداخل تجميع الموجتين؛ بحيث تقوي إحداهما

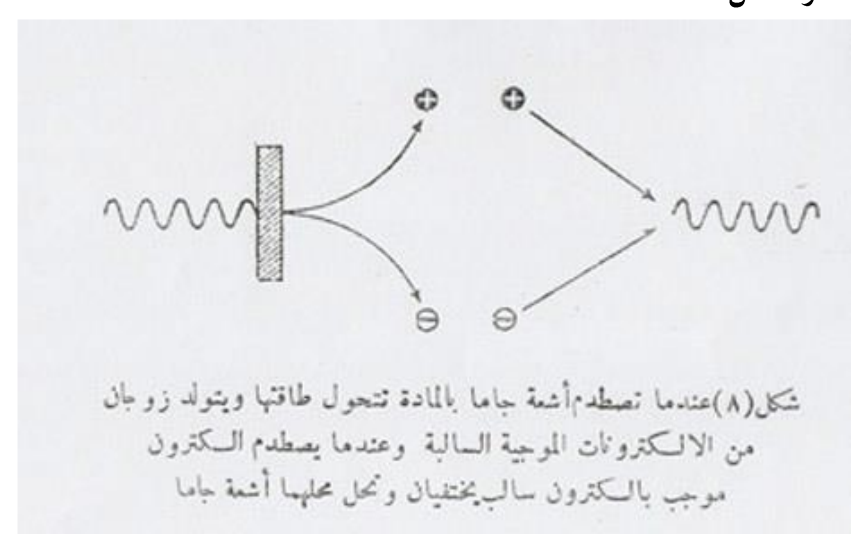
الأخرى في لحظات معينة، ومعنى ذلك أن النهايتين العظميين للموجتين يتلاقيان، وفي لحظات أخرى تلاشى إحداهما الأخرى ،إذا تلاقت نهاية عظمى لإحداهما مع نهاية صغرى للأخرى، فينتج من تداخلهما معاً مناطق مضيئة وأخرى مظلمة.

وكانت تجربة "دافيسون" و"جرمير" هي الفيصل في نظرية "دي برولي"، وعلى نتيجتها ينبى نجاح هذه النظرية، وفي هذه التجربة تؤدى البللورات– التي تحتوى على ذرات موضوعة، وضعاً منتظماً– عمل الشبكة التي تسمح للإلكترونات بالمرور، وكانت النتيجة نجاحاً باهراً فقد أمكن الحصول على صورة شبيهة ،بالصورة الناتجة عن مرور أشعة "رونتجن" في المادة شكل (**7**) وهي مماثلة لشكل (**6**) الذي يبين مرور أشعة الضوء في قطعة القماش ،ولاقت حيئنذ نظرية "دي برولي" نجاحاً منقطع النظير بسبب هذه التجربة.



شكل (٧)مقارنة بين حيود موجات أشعة رونتجن إلى اليسار وموجات الالكترونات إلى اليمين

وبعد هذا النجاح– يأتى السؤال الذي يدور بخلد العلماء دائماً هو وصلنا إلى حل الغموض الذي حولنا بعد هذا النجاح؟ والجواب دائماً ألقت هذه التجربة بعض الضوء، ولكن لا زال الموقف محتاجاً إلى مزيد من العمل والجهد لإزالة الغموض، بل لقد فتحت آفاق جديدة للعمل، وأصبحت أنواع الإشعاعات المختلفة من ضوء إلى حرارة إلى أشعة فوق بنفسجية إلى أشعة رونتجن وأشعة جاما تعتبر صوراً مختلفة للأمواج الكهربائية المغناطيسية كلها متشابهة في الخواص ومختلفة في طول الموجة انظر شكل **8**.



شكل(٨)عندما تصطدم أشعة جاما بالمادة تتحول طاقتها ويتولد زوجان من الالكترونات الموجبة السالبة وعندما يصطدم الكترون موجب بالكترون سالب يختفيان وتحل محلهما أشعة جاما

المادة والإشعاع:

وكاد الفرق بين المادة والإشعاع يزول بعد أن اتضح التشابه بين الظاهرة الضوئية الكهربية وحيود الإلكترونات، وبعض الخواص الأخرى إلى أن

ربط "ديراك" في سنة 1930 بين الاثنين حينما بيّن إمكان تحويل المادة إلى إشعاع،

فتحدث "ديراك" عن الكتلة السالبة والكتلة الموجبة، وكان حديثه حديثاً رياضياً بحتاً من الصعب إدراكه حسيّاً ،فكيف يمكن أن تتصور أو تدرك كرة سالبة الكتلة، أو تتصور إلكتروناً سالب الكتلة؟ ربما استطعنا بمرور الزمن أن نفهم الآن معنى ذلك ففى دنيا "ديراك"، الكتلة السالبة تعنى لا كتلة ،أي قضاء في حاجة إلى كتلة، وإدراك هذا المعنى لم يكن ميسوراً في ذلك العهد، حتى أن بعض رجال الطبيعة ،بالرغم من إعجابهم بنظرية "ديراك" رفضوا تصديقها، وحسب نظرية "ديراك"، توجد أماكن في الفراغ شاغرة يمكن أن تحتلها إلكترونات، ولكن هذه الإلكترونات غير موجودة ،فتظهر هذه الأماكن في الفراغ كأنها ثقوب، وفرق "ديراك" بين الثقب وبين الفجوة، فالثقب شئ يمكن ملاحظته أشبه ما يكون بالكراسي الشاغرة في إحدى الحفلات، وهذه الثقوب صالحة لاستقبال الإلكترونات، ولكنها تظهر على هيئة إلكترونات ذات شحنة موجبة– تصور جميل، وأجمل منه أن هذا التصور نفسه بدأ قبل اكتشاف الإلكترون ذي الشحنة الموجبة عملياً.

وتقول النظرية إن هذا الثقب إذا صادفه إلكترون سالب معتاد احتله ،وتلاشى فإتحد الإلكترون مع الثقب أو تفاعل الإلكترون السالب مع الإلكترون الموجب ،وتلاشت الكتلتان ،والدليل الذي تتركانه هو انبعاث طاقة إشعاعية في الفضاء؛ دليلاً شاهداً على اختفائها ولكن، هل

يحدث عكس هذا؟؟ أي هل يمكن أن يتولد عن الإشعاع إلكترونان أحدهما سالب والآخر موجب؟.

أجاب "ندرسون" في سنة **1932** عن هذا السؤال وكذلك "بلاكت" عندما اكتشفا وجود الإلكترون الموجب ضمن الأشعة الكونية ،عندما تصطدم أشعة جاما بالمادة، وينتج عن هذا التصادم إلكترونان: أحدهما سالب والآخر موجب ،ثم أمكن عملياً إثبات أن الإلكترون الموجب يتحد بالإلكترون السالب؛ لتنتج عنهما أشعة جاما، وهنا تحققت نبوءة "ديراك" (شكل **9**) وفتحت آفاق جديدة في عالم الاكتشافات، وتنبأ المتنبئون بوجود البروتون السالب، كما تنبأ "ديراك" بوجود الإلكترون الموجب، فمن الواضح إذن أن المادة في عالمنا تحتوي على إلكترونات سالبة وبروتونات موجبة، ويقابل الإلكترون السالب إلكترون موجب، وقد أمكن إثبات وجود البروتون السالب أيضاً ليقابل البروتون الموجب.

عالمنا أبسط مما كنا نتصور:

وهنا يجدر بالذكر الإشارة إلى العلاقة التي أوجدها أينشتاين، لتربط بين الكتلة والطاقة ،وبين قوانين بقاء الكتلة والطاقة؛ فقد ذكر أينشتاين أنه: من الممكن تحويل المادة إلى طاقة والطاقة إلى مادة ،ويعتبر تحول الإلكترونات إلى إشعاع ،وتحول الإشعاع إلى إلكترونات ،أول تحقيق لقانون أينشتاين ،وبهذا يبدو عالمنا أبسط مما كنا نتصور، فالتشابه بين

الجسيمات والأمواج ،وبين الطاقة والمادة ،يكون علم الطبيعة قد خطا خطوة كبيرة نحو توحيد الظواهر التي ينبني عليها هذا العالم.

الموجات الالكترونية

ربما يمكن إرجاع تاريخ الصفة الموجبة للإلكترون إلى ما قبل" دي برولي" عندما حسب "شرودنجر" ما يحدث - عندما تصطدم الموجات التي تمثل الإلكترون بالبروتون، فوجد أن هذه الموجات تحيد بواسطة البروتونات ،

كما تحيد أمواج الضوء عندما تمر في قماش المظلة (شكل **6**) ،وفي بعض الأحيان تنحنى موجة الإلكترون حول البروتون، مكونة شكل حلقة كما يحدث عندما يسقط شعاع ضوئي على جسم صغير، ونحن كثيراً ما نرى مثل هذه الحلقات أمام أعيننا ،عندما ننظر إلى السماء وتتسبب عن حيود الضوء على نقط دقيقة من الغبار تكون قد استقرت على إنسان العين. أما الموجة الإلكترونية التي تمثل الشحنة السالبة فتبقى مع البروتون، وتحيط به كحلقة صغيرة دائرية وتتكون منها ذرة الأيدروجين.

وكما أن للموجات العادية خواصها وتتميز بطولها وعدد ذبذباتها، فكذلك الموجات الإلكترونية تعرف بذبذباتها المعينة وسلوكها، الذي تجدده طبيعة الإلكترون والبروتون، فموجات الإلكترون حول البروتون يمكن أن تكون حلقات معينة تعرف بحلقات الحيود، وهي بذاتها المدرات التي أشار إليها نموذج "بوهر" كمدارات للإلكترون في ذرة الأيدروجين، وبتمثيل مدارات الإلكترون بأنها أشكال الحيود الطبيعية للموجات الإلكترونية ،يمكن أن نبين السبب في وجود هذه المدارات ،ويمكن إعطاء

معنى جديد لتركيب الذرة– وبالرجوع إلى حلقات الحيود حول النواة ،تعطي صورة مبسطة على قدر الإمكان حيث أن النموذج الذري مجسم وليس سطحاً ؛ولذا فموجات الإلكترون يمكن أن تعتبر غلافاً كروياً للنواة، وليس غلافاً حلقياً ولكننا بهذه الصورة المبسطة نتصور قطاعات في غلاف النواة.

وحلقات الحيود لموجات الإلكترون لا تعطي أي دليل على مكان الإلكترون.

هيزنبرج ومبدأ الاحققية:

وهذا هو ما حير دى برولي كثيراً، وأوجد شيئاً من التردد عند رجال الطبيعة لقبول نظريته؛ ولذا لم يذكر "دى برولي" أن الإلكترون موجة، ولكنه وصف حركة الإلكترون بأنها مصحوبة بموجة فأين مكان الإلكترون من هذه الموجة؟ هل هو شئ صغير في وسط مجموعة الأمواج؟ وهل هو متحرك في الموجة؟ أو هل هو منتشر على طول الموجة؟ وهل الأمواج والإلكترونات تعنى نفس الشئ؟ وهنا تقدم العالم الألماني "هيز نبرج" ووضع حدا للجدل في الموضوع ،وإن كان لم يجب على السؤال حين قال: إنه لا يحب الحديث عن موضع الإلكترون وعن سرعته، إلا إذا كانت لدينا الوسائل لتعيينهما وبين أن اللامحققية في تعيين موضع وسرعة الإلكترون لا علاقة لها بنوع التجربة ولكنها متعلقة بطبيعة الأشياء، وأنها لا مناص منها ،وعرف مبدأ "هيزنبرج" بمبدأ اللامحققية وأثار جدلاً كبيراً بين رجال الطبيعة والفلاسفة في ذلك الوقت، ووضع مبدأ اللامحققية

لهيزنبرج نهاية لمحاولات تحديد مكان الإلكترون داخل حدود موجة "دي برولي" ولكنه لم يفك لغز هذه الموجة بعد.

الاحتمالات:

لو أننا أردنا أن ننظر إلى الذرة المشعة والمستقرة حسب معلوماتنا عن الطبيعة الكلاسيكية والميكانيكا العادية ،فإننا نجد أن الذرة إما مستقرة أي لا تتغير أو غير مستقرة، وحينئذ يجب أن تتحول كلها بالإشعاع دون تأخير: فهل هذا هو الحال عندما نحاول معرفة ما يحدث في ذرة مشعة؟ وإذا كانت الذرة غير مستقرة كما هو الحال مثلاً في ذرات الراديوم، وهي ذرات متشابهة فلماذا تنبعث أشعة ألفا من ذرة معينة في زمن معين بينما تظل الذرة المجاورة لها خاملة لآلاف من السنين؟

هذا السؤال لا تستطيع الطبيعة الكلاسيكية الإجابة عليه، ولكن يمكن حله بطرق الميكانيكا الموجية، فالجسيمات التي تكون النواة وهي البروتونات والنيوترونات محدودة في حوض للطاقة، وأمواج "دي برولي" للجسيمات التي تكون النواة تقع داخل هذا الحوض وتنفذ إلى حد ما خلال جدرانه، وعندما يزداد ثقل الذرات بازدياد عدد جسيماتها المعبأة في الحوض، تصل إلى حالة تتسرب فيها الموجات خلال جدار الحوض، وليس معنى هذا أن جسيماً أو أكثر من داخل الحوض يتركه في الحال ويطير منه. وعندما تتسرب أهداب هذه الموجات خلال الحائط، فمعنى ذلك أن الجسيمات لديها فرصة ولو صغيرة لتتواجد خارج الحوض بدلاً من داخله، وجميع أمواج "دي برولي" تبقى دائماً داخل هذا الحوض إذا

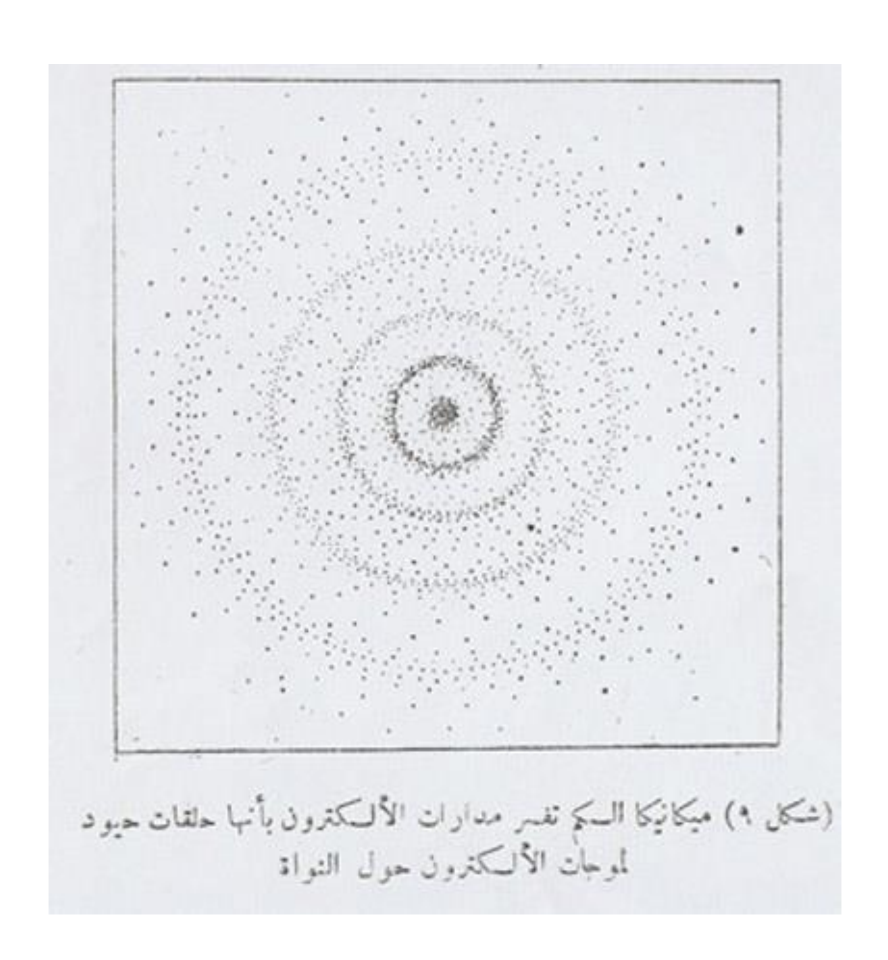
كان عدد الجسيمات **83** أو أقل ،أما إذا زاد العدد عن **83** أي ابتداء من **84** فأكثر، فإن الذرات تصبح مشعة: ففى حالة الراديوم مثلاً يوجد احتمال صغير لهروب جسيمات النواة، ولو أن الجسيم الخارج هو جسيم ألفا إلا أن جميع ذرات الراديوم لها فرص متكافئة؛ لبعث هذا الجسيم ،ولكن لا يمكن التكهن بالموعد الذي تفقد فيه ذرة معينة دقيقة ألفية(2)فربما كانت اللحظة القادمة وربما حدث ذلك بعد مائة سنة أو مائة ألف سنة: فمبدأ اللامحققية يجعل من المستحيل التكهن بموعد انفجار ذرة معينة، ولكننا يمكن أن نقول إن عمر نصف الراديوم **1600** سنة، أي أن نصف قطعة معينة من الراديوم تنتهي في **1600** سنة، كما لا يجوز أن نتنبأ بأن طفلاً أنجبه جار لنا يمكن أن يكون ذكراً أو أنثى، ولكن لو كان لدينا مليون طفل، لأمكن القول أن نصف عدد هؤلاء الأطفال ذكور والنصف الآخر إناث.

ولاشك أن نظرية "بوهر" حلت كثيراً من الصعوبات وحلقات الحيود ل"شرودنجر" التي حلت محل مدارات "بوهر" للإلكترون: وضعت معنى جديداً؛ فهي توضح كيف يكون احتمال وجود الإلكترون في نقطة معينة كبيراً.

ومدارات الإلكترون المعروفة هي الأماكن التي يكون احتمال وجود الإلكترون فيها كبيراً– ولا يمكن تحديد موضع الإلكترون بالدقة، ولكن يمكن أن يتحدث عن احتمال وجوده في مكان معين شكل (**9**).

---

(2)دقيقة ألفية أو جسيم ألفا تطلق على **Alpha particle**.



(شكل ٩) ميكانيكا الكم تفسر مدارات الألكترون بأنها حلقات حيود لموجات الألكترون حول النواة

النواة

نواة الذرة هي قلبها الذي يتركز فيه وزنها، وقطرها صغير جداً ؛بحيث تبلغ نسبته إلى قطر الذرة 1 إلى 10.000 وتتكون النواة من جسيمات، تسمى "نيوكلونات" وهي نوعان إما بروتونات ذات شحنة موجبة تساوى شحنة الإلكترون أو نيونزونات متعادلة لا شحنة فيها، ويحيط بالنواة مدارات مختلفة تحتوى على سحب الإلكترونات.

ومعنى ذلك أن النواة لا تحتوي على إلكترونات ،كما كان معروفاً من قبل ،وهنا تواجهنا مشكلتان لفهم النواة: فكيف نفسر وجود البروتونات موجبة الشحنة بعضها بجانب البعض داخل النواة دون أن تباعد قوى التنافر بين بعضها البعض؟ وكيف نفسر انبعاث إلكترونات من النواة على هيئة أشعة بيننا؟ للإجابة على السؤال الأول.

وجد العلماء أنفسهم مضطرين لافتراض وجود قوة قصيرة المدى ،لا تتعدى الأبعاد الذرية لتفسير التجاذب بين الجسيمات ؛حيث أن هذا هو التفسير الوحيد لترابط هذه الجسيمات بعضها مع بعض، داخل هذا الحيز الضيق ؛حتى إذا كبرت الأبعاد بطل مفعول هذه القوى، وحلت محلها القوانين المعروفة في الأبعاد العادية. أما السؤال الثاني فسوف تؤجل الإجابة عليه مؤقتا لحين الحديث عن القوى الرابطة والميزون.

النظائر:

وقبل البحث في نوع هذه القوى وكنهها، ندرس هنا أنواع الذرات المختلفة، ما يربو على **80** عنصراً لكل عنصر وفرته في الطبيعة، فإننا نعرف الآن ما يربو على **250** ذرة، ما بين مستقر وغير مستقر، وإن كان مجموع العناصر، قد يصل إلى المائة أو يزيد قليلاً ،إلا أنه أصبح معروفاً الآن أن بعض العناصر تشترك في العدد الذري[3] ،وتختلف في

---

[3] العدد الذري: هو عدد البروتونات بالنواة.

العدد الكتلي[4] ،وسميت بالنظائر وهي صور مختلفة لعنصر واحد، ما دام العدد الذري فيها متساوياً مثل ذلك: الايدروجين الذي يحتوى على بروتون واحد، ولا يحتوى على نيوترونات، ولهذا العنصر نظير أثقل قليلاً يسمى الديونزيوم يحتوى على نيونزون، علاوة على البروتون ،كما أن له نظيراً آخر يسمى الترنيوم ،يحتوى على نيوترونين ،وتتلخص صفات هذه النظائر في الجدول الآتي:

جدول (**1**)

	العدد الذري عدد البروتونات	العدد الكتلى	عدد النيوترونات
الأيدروجين	1	1	–
الديوتيريوم	1	2	1
التريتيوم	1	3	2

وعلى هذا النسق يمكن أن نجد عدداً كبيراً من النظائر للمواد المختلفة ،بعضها يوجد في الطبيعة، وبعضها يحضر صناعياً في المعمل: وبعض هذه النظائر مستقر أي لا تنبعث منها إشعاعات، وبعضها غير مستقر ،يتحول من نظير إلى آخر بعد أن ينبعث منه جسيم أو أكثر. مثال النظير المشع :عنصر الراديوم ،وهو نظير مشع يشع جسيمات ألفا،

---

[4] العدد الكتلى: هو عدد البروتونات والنيوترونات بالنواة.

وعمر نصفه[5]تبلغ نحو 1580 سنة، أى أنه لو كان لدينا جرامان من الراديوم؛ لفنى جرام منها بعد 1580 سنة بالإشعاع، ومعنى ذلك أن إحدى ذرات الراديوم قد ينبعث منها جسيم ألفاً في لحظة ما: وربما بقيت الذرة المجاورة لها ،ساكنة لآلاف من السنين. فليس معروفاً أي ذرة ستتحول في أي وقت في حين أن ذرات الراديوم جميعاً متشابهة: والإلكترونات السالبة والموجة، إذا كانت تنبعث من نوى بعض النظائر المشعة، فإنها قد تنبعث أيضاً نتيجة تفاعل نووي، بين بعض النوى والقذائف النووية ،وفي مثل هذه التفاعلات تنتج بعض ذرات غير مستقرة ذات فعالية إشعاعية، تنبعث منها إلكترونات سالبة أو موجبة، وقد يصحب هذه الإلكترونات جسيم متعادل أو أكثر، هذا الجسيم صغير صغراً متناهياً بالنسبة للإلكترون ويطلق عليه اسم النيوترنيو، ويكاد يكون عديم الوزن ،وللذرات المشعة غير المستقرة أعمار معينة، تختلف باختلاف أنواعها ،فمنها ذات العمر الطويل الذي يبلغ آلاف السنين، ومنها ما يبلغ عمره ساعات ،أو دقائق ،أو أقل ،وهناك بعض الجسيمات غير المستقرة يصل عمرها إلى أقل من جزء من مليون من الثانية ،وبعضها أصغر من ذلك بمليون مرة أخرى، وفي بعض هذه التفاعلات تنبعث أيضاً أشعة جاما.

---

[5]عمر النصف: هو الزمن الذي ينقضي لتنقص قوة الإشعاع إلى النصف.

حوض الطاقة:

بقى انبعاث جسيم ألفا من إحدى ذرات الراديوم، دون المجاورة مع تشابه الذرتين في كل شئ لغزاً، إلى أن افترض العلماء حلاً لهذه المشكلة: أن الجسيمات التي تكوّن النواة، وهي البروتونات والنيونزونات محتواة في حوض من الطاقة.

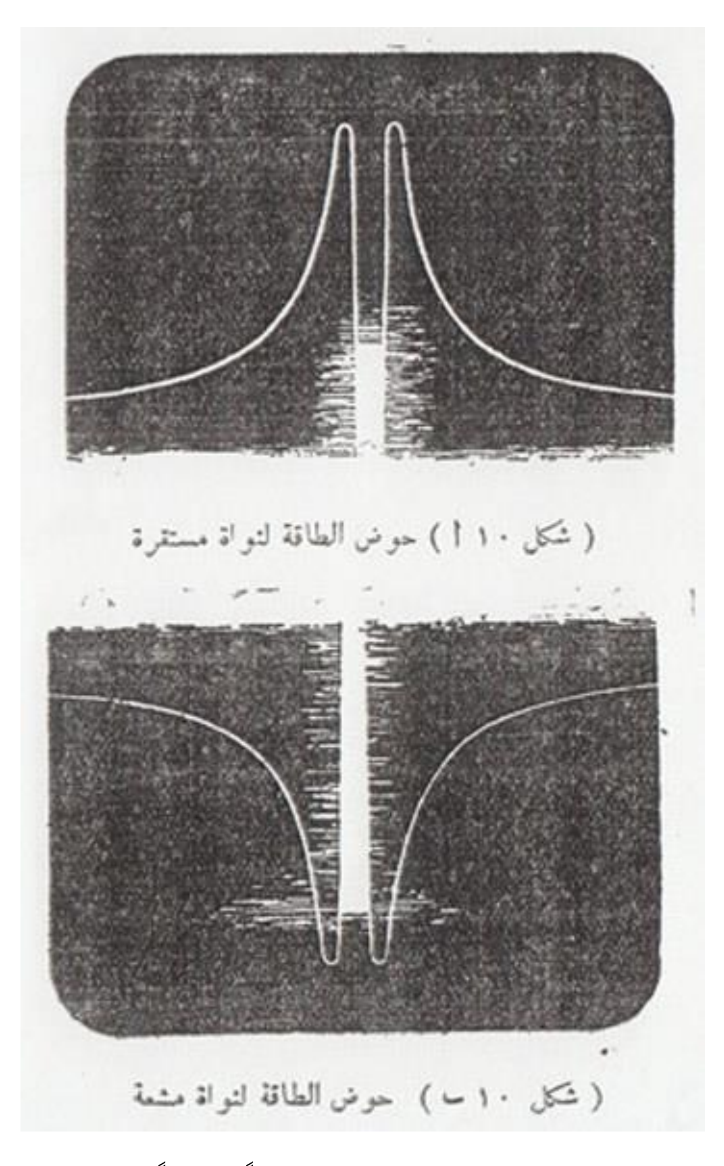
ولهذا الحوض حوائط من القوى ذات صفات معينة، فتسمح لموجات "دى برولي" محبوسة داخل الجدران السميكة ،أما إذا زاد العدد الذرى ،وزاد تبعاً لذلك عدد النيوكلونات المحتواة في الحوض إلى 82 و83 (الرصاص والبزموت) ،أو أكثر فإن موجات "دي برولي" تتسرب من الحوائط المدببة، وليس معنى هذا أن الجسيمات تترك النواة في الحال، وتطير إلى الخارج ؛إذ أن موجات "دي برولي" هي موجات احتمال، وعندما تتسرب فمعنى ذلك :أن لدى الجسيمات فرصة معينة للتواجد خارج حوض الطاقة، بدلاً من تواجدها داخله، وإن كانت هذه الفرصة صغيرة، وفي حالة الذرات المشعة يكون للجسيمات داخل النواة احتمال الانبعاث خارجها، وإذا كان مستوى الطاقة للجسم قريباً من أعلى الحوض ،كان احتمال اتساعه كبيراً ،أما إذا كان مستوى الطاقة منخفضاً، فإن احتمال انبعاث الجسيم يكون صغيراً شكل (10)، ولذا فإن احتمال انبعاث الجسيمات من الذرات الكبيرة (ذات العدد الكتلى الكبير) كبير نظراً لأن مستوى الطاقة فيها مرتفع؟

قوى الترابط في النواة:

لما كان نصف النيوكلونات تقريباً يتكون من بروتونات موجبة الشحنة: ولما كان وجود هذه الشحنة الموجبة تتولد عنه قوة تنافر نظراً لتشابه الشحنة ،فقد لزم أن نفترض وجود قوة ترابط أو تجاذب من نوع آخر؛ حيث أن القوى الناتجة عن الشحنة قوى عكسية ،لا تؤدى إلى الترابط. لمعرفة نوع هذه القوة سوف نحاول أن نقارن بين ما يحدث داخل النواة وخارجها. نحن نعرف أن الإلكترونات التي تسبح في مداراتها حول النواة، إذا انتقل أحدها من مدار إلى مدار أكبر، فإنه يمكن أن يعود إلى مداره الأصلي بعد أن ينبعث من الذرة فوتون[6] ،أو شعاع من أشعة جاما ،ويمكن أن نقارن بهذه الحالة حالة انبعاث فوتونات أو أشعة جاما ذات الموجة القصيرة عند التحول النووي، ولذا يلزم أن تكون هناك صلة بين القوى النووية، وبين ما يحدث من انبعاث الإلكترونات السالبة والموجبة بعد التفاعلات النووية بزمن معين، وهذا يلقى بعض الضوء على الصورة الغامضة ،فيمكن أن يعتبر المجال الكهربائي الناشئ عن وجود البروتونات المشحونة سبباً في انبعاث أشعة جاما ،كما يعتبر المجال النيوتروني سبباً في انبعاث الإلكترونات والنيوترنيو، والصلة في هذه الحالة وإن كانت أكيدة إلا أنها ليست صلة بسيطة.

---

[6] الفوتون هو وحدة الطاقة الضوئية.



(شكل ١٠ أ) حوض الطاقة لنواة مستقرة

(شكل ١٠ ب) حوض الطاقة لنواة مشعة

ولسهولة فهم هذه القوى نأخذ مثالاً بسيطاً ذرة الايدروجين الثقيل ،التي تحتوى نواتها على بروتون ونيونزون وتسمى الديونزون، فإذا عرفت القوة التي تربط البروتون بالنيوترون داخل الديونزون فإنها تلقى ضوءاً على نوع القوى داخل النواة. تتكون ذرة الديونزيوم من اتحاد ذرة

ايدروجين خفيف مع نيونزون، وفي هذه الحالة تنبعث أشعة جاما، ولما كان وزن ذرة الديونزيون 2.0147 وحدة كتلة ذرة بينما مجموع وزن ذرة الايدروجين والنيونزون= 1.00813 +1.0095 =2.0171 وحدة كتلة ذرية، فإن وزن ذرة الديونزيون أصغر من مجموع وزني ذرة الايدروجين والنيونزون، والفرق يساوى 0.0024 وحدة كتلة ذرية، وهذا هو نقصان الوزن ويعادل 2.2 مليون إلكترون فولت، وهذه هي الطاقة المنطلقة على هيئة فموتونات وتمثل الطاقة الرابطة، وهذه القوة بين البروتون والنيوتون موجودة إذن، فلو أننا قذفنا مادة محتوية للايدروجين ،مثل: البرافين أو الماء بقذيفة نيوترونية ،فإن النيوترومات تنحرف عن مسارها المستقيم ،ويعتمد مقدار هذا الانحراف على المسافة بين البروتون والنيوترون، ويلاحظ أن هذا الانحراف يزيد عندما تكون المسافة صغيرة بين البروتون والنيوترون، ويمكن القول بأن القوة بينهما تصغر جداً ،عندما تكون المسافة أكبر من 5×10−13سم ومعنى ذلك أن هذه القوة من النوع القصير المدى.

القوى الرابطة والميزون:

ولتفسير هذه القوى افترض العالم اليابابي في سنة 1934 أن البروتونات والنيوترونات تتبادل الشحنة داخل النواة، بعد أن حسب قوى التبادل المختلفة ،واستنتج أهما يتبادلان جسيماً مشحوناً شحنته تساوى شحنة الإلكترون، ووزنه أكبر من وزن الإلكترون وأقل من وزن البروتون، واعتبر ذلك الاكتشاف في ذلك الوقت مجرد فرض نظرى؛ لتفسير القوى

الرابطة ،إلا أن العلماء لم يلبثوا بعد سنتين أن اكتشفوا ضمن الأشعة الكونية جسيماً له نفس صفات جسمية يوكاوا ،ووجدوا أنه قصير العمر، وعرفوه بالميزون ،وعرف أن هذا النوع من الجسيمات يتحول إلى الكترونات وجسيمات أخرى من نوع النيوترينو، وهذا تفسير انبعاث الإلكترونات وجسيمات النيوترينو من النواة، وعرف حديثاً أن جسيمات يوكاوا وزنها يبلغ نحو 275 وزن الاكترون.

الأعداد الزوجية والفردية في النواة:

وقد إتضح أن كل نيوترون يستطيع أن يربط نفسه بعدد لا يتحاوز اثنين من البروتونات، وأن كل برتون يربط نفسه بعدد لا يتجاوز اثنين من النيوترونات؛ ولذا كان من المنتظر أن تكون الذرة مستقرة إذا كان عدد بروتوناتها زوجياً وعدد نيوتروناتها زوجياً أيضاً، ومثال ذلك: ذرة الهليوم ،وهي ذرة مستقرة تحتوى نواتها على بروتونين ونيوترونين ،ويحتوى مدارها على إلكترونين، والهليوم لا يدخل في أي اتحاد كيميائي على الإطلاق، وطاقته الرابطة عالية فتبلغ 30 مليون إلكترون فولت في حين أنها 2.2 مليون إلكترون فولت للديونزيوم.

ولذا فالمواد التي يكون عدد البروتونات والنيوترونات زوجياً في ذراتها تعتبر وافرة في الطبيعة ؛في حين أن المواد التي تكون ذراتها فردية العدد في بروتوناتها ونيوتروناتها، تكن نادرة ومثال المواد الوفيرة الأكسجين الذي يبلغ عدد بروتوناته 8 وعدد نيوترناته 8 أيضاً ،أما الليثيوم الذي عدد بروتوناته 3 فنادر الوجود كما أن قليلاً من الذرات

ذات العدد الفردي للبروتونات والنيوترونات تعتبر مستقرة ،مثال ذلك :الديوتريوم والليثيوم والبورون والنتروجين حسب ما هو مبين بالجدول :2.

جدول (2)

الذرات المستقرة من بين فردية العدد في البروتونات والنيوترونات

نوع الذرة	عدد البروتونات	عدد النيوترنات	العدد الكتلى
الديوتريوم	1	1	2
الليثيوم	3	3	6
البورون	5	5	10
النتروجين	7	7	14

وباقى الذرات من هذا النوع ذرات مشعة ،وتتحول بعد أن ينبعث منها إلكترون أو بوزترون.

ومن دراسة خواص الذرات المختلفة وجد أنه إذا كان العدد الكتلي زوجياً، وكان كذلك عدد البروتونات وعدد النيوترونات زوجياً، فإنه من الممكن وجود عدة نوى مستقرة تبلغ اثنين أو ثلاثة.

وإذا كان العدد الكتلي زوجياً وعدد البروتونات فردياً وعدد النيوترونات فردياً كذلك، فالقاعدة أن جميع النوى في هذه الحالة تكون غير مستقرة باستثناء النوى الخفيفة المذكورة في جدول 2 ،ومن أمثلة النوى غير المستقرة نظير الفوسفور الذي عدده الكتلي 30 أو 32 ويمكن صناعتها في المعمل.

فإذا استخدم جسيم ألفا لتقذف به نواة الألومنيوم ،نتج عن التفاعل نظير الفوسفور الذي عدده الكتلي 30 وعدد بروتوناته 15 ونيوتروناته 15، وكذلك يمكن إنتاج الفوسفور الذي عدده الكتلي 32 عند قذف نواة الفوسفور 31 بالنيوترونات ،وفي هذه الحالة يصبح عدد النيوترونات 17 ،ولكن هذه النظائر المصنوعة في المعمل غير مستقرة بينما الفوسفور 31 وبه 15 بروتون، 15 نيوترون هو الوحيد المستقر في مجموعة نظائر الفوسفور.

الانشطار النووي

أبحاث تحوّل العناصر عند العرب:

منذ أكثر من ألف سنة ،وفي القرن الأول الهجري، فكر الكيمائيون العرب في تحويل العناصر بعضها إلى بعض ،وكان أولهم "خالد بن يزيد"، وتلاه "جابر بن حيان"،

ثم "أبو بكر الرازي" الطبيب الكيماوى والفيلسوف ،وكان الجميع يهدفون إلى تحويل العناصر إلى ذهب بالطرق الكيماوية، ولو أننا نعلم الآن أن الطرق الكيماوية لا تؤدى إلى تحويل العناصر ،إلا ان فكرة إمكان التحول في حد ذاتها التى أصبحت الآن ممكنة بالطرق الطبيعة بعد أن أصبح لدى الإنسان فهم أعمق لأسرار الذرة ،هذه الفكرة كانت موجودة عند العرب من ألف سنة على الأقل، وكانوا يتصورون أن الزئبق يمكن أن يتحول إلى ذهب، وعرف أيضاً أن كل المواد يمكن أن ترجع إلى عناصر أساسية ،ومن هنا تطور علم الكمياء، وعرفت طرق التحليل المختلفة ،وعرف التكليس والتصعيد إلى غير ذلك ،وكان أشهر علماء العرب في ذلك الوقت هو: جابر بن حيان ومن العرب انتقل البحث في هذا الموضوع إلى أوربا.

حارة الذهب:

في وسط أوربا، وفي قلب تشكوسلوفاكيا، في مدينة براغ، حيث توجد القلعة القديمة لملوك بوهيميا تقع حارة الذهب!! هذا هو المكان الذي

استخدمه الإمبراطور "رودلف الثاني" منذ أكثر من ثلثمائة سنة ،كمحطة أبحاث سرية للحكومة أقام فيها الكيمائيون، وكانت مهمتهم محاولة الحصول على الذهب الصناعي. وقد كانوا يطلقون على هدفهم الكشف عن حجر الفلاسفة، وقد قدم لهم الإمبراطور مساعدات عديدة ،وأصبح أحد الهواة في العلم والفلك، وربما كان السبب في الاهتمام بعلم الكيمياء في ذلك الوقت التقدم الذي أحرزه العلم قبل ذلك حينما أمكن تحويل الرخام إلى غاز، والمعدن إلى ملح ،فلم لا يحاولون صناعة الذهب بتحويل أحد العناصر الأخرى إليه ما حاول العرب من قبل؟.

الطبيعة النووية منذ 40 سنة:

هذا هو موقف علماء الطبيعة النووية منذ نحو أربعين سنة، وهو يماثل موقف الكيماويين منذ ثلاثة قرون أو أكثر.

نجح "رزرفورد" في تحويل ذرات النتروجين إلى أكسجين، ومنذ ذلك الوقت وعلماء الطبيعة يبذلون جهدهم للبحث عن سر النواة ،وعن تفاعلات نووية جديدة.

أهم التفاعلات النووية:

وتحدث أهم التفاعلات النووية عند قذف الهدف بالبروتون أو الديوترون أو جسيم ألفا أو النيوترون كما هو مبين في الجدول الآتي:

جدول (3) أهم التفاعلات النووية وما ينتج عنها. لا يبين الجدول أشعة جاما التي يمكن انبعاثها في المراحل المختلفة

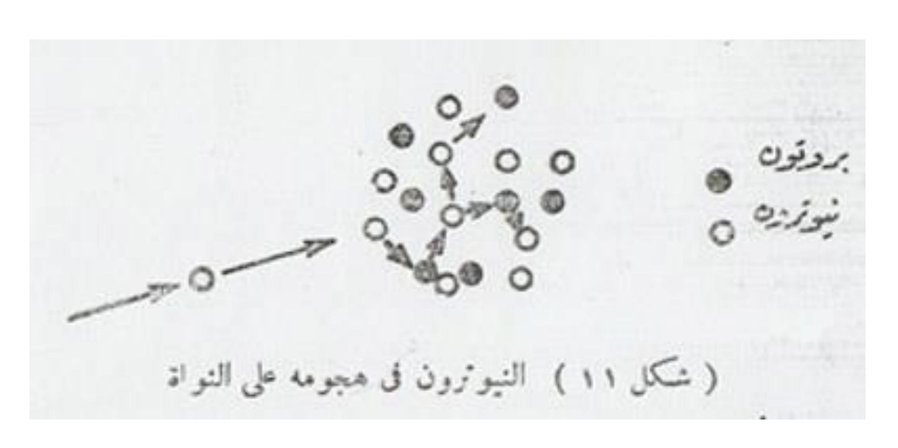
نوع القذيفة	حالة النواة بعد التقاف القذيفة مباشرة	الجسيمات المنبعة من النواة	حالة النواة بعد انبعاث الجسيمات منها	الجسيمات المنبعثة من النواة الجديدة	الحالة النهائية للنواة
بروتون	غير مستقرة	بوزترون	مستقرة	–	–
بروتون	نواة مركبة	جسيم ألفا	مستقرة	–	–
بروتون	نواة مركبة	نيوترون	غير مستقرة	بوزترون	مستقرة
ديوترون	نواة مركبة	بروتون	غير مستقرة	إلكترون	مستقرة
ديوترون	نواة مركبة	جسيم ألفا	مستقرة	–	–
ديوترون	نواة مركبة	نيوترون	غير مستقرة	بوزترون	مستقرة
جسيم ألفا	نواة مركبة	بروتون	مستقرة	–	–
جسيم ألفا	نواة مركبة	نيوترون	غير مستقرة	بوزترون	مستقرة
نيوترون	غير مستقرة	إلكترون	مستقرة	–	–
نيوترون	نواة مركبة	بروتون	غير مستقرة	إلكترون	مستقرة
نيوترون	نواة مركبة	جسيم ألفا	غير مستقرة	إلكترون	مستقرة

وعلاوة على هذه التفاعلات ،تنتج بعض تفاعلات أخرى ؛نتيجة تفاعل النواة مع أشعة جاما.

النواة المركبة:

وتفصيل هذه التفاعلات بينه "بوهر" حين فرض أن القذيفة النووية إذا أبت نواة تستقر فيها قليلاً فتضيف القذيفة إلى النواة طاقة حركتها التي دخلت بها إلى النواة ،وتوزع هذه الطاقة على أفراد النواة، فإذا كانت النواة خفيفة وليست مكتظة بالنيوكلونات، فإن القذيفة النووية يحتمل أن تنفذ خلال النواة ،كما ينفذ الضوء خلال الزجاج دون أن يعترض مرورها شئ. أما إذا كانت النواة تحتوي عدداً أكبر من النيوكلونات ،فهناك احتمال التصادم بينها وبين القذيفة، وعندئذ توزع الطاقة القذيفة على النيوكلونات بسرعة كبيرة ثم على النواة كلها شكل 11، صورة نواة يتقدم نحوها نيوترون ترمز له بدائرة بيضاء، في حين ترمز للبروتون بدائرة سوداء، وكما يتضح من الأسهم فإن جميع الجسيمات النووية، داخل النواة تتلقى دفعة من النيوترون القريب الساقط عليها من الخارج ،وعندما يسقط النيوترون على النواة وتوزع طاقة على النواة كلها ،يقال للنواة إنها أصبحت ساخنة ،ويشبه ذلك إطلاق رصاصة على كومة من الرمل؛ فهى تسخن بعد انطلاق الرصاصة عليها ولنأخذ لذلك مثلاً جسماً طاقته 8 مليون إلكترون فولت أطلق على نواة ما فبمقارنة ذلك بقوانين الحركة للغازات، نجد أن درجة الحرارة لهذه النواة تصبح نحو 10.000 مليون درجة ،وهي درجة عالية ،ولكنها تؤثر فقط في الجزء

الصغير الذي تسقط عليه، وبمقارنة النواة بقطرة الماء ،نجد أن النواة يجب أن تتبخر عند درجات الحرارة العالية، كما تتبخر قطرة الماء؛ ومعنى ذلك أن جسيماً أو أكثر من داخل النواة يجب أن تنبعث منها والنواة المركبة نواة غير مستقرة يجب أن تتخلص من جزء من طاقتها ؛حتى تصبح نواة مستقرة.



(شكل ١١) النيوترون فى هجومه على النواة

ويكون التخلص من الطاقة الزائدة على هيئة أشعة جاما، أو بقذف جسيم معين كما هو واضح في جدول 1- وتحدث منافسة بين الطرق المختلفة للتخلص من الطاقة الزائدة، وأيهما أسرع في تقديم الخدمة للنواة المركبة، بحمل العبء الأكبر. ومثال ذلك تحول البروتون إلى نيوترون ،وانبعاث إلكترون نتيجة لهذا عملية بطيئة ومعقدة ،ولذا فاحتمال حدوثها أَعف من احتمال انبعاث أشعة جاما أو نيوترون، فإذا تخلصت النواة من طاقتها على هيئة إلكترون، ينبعث فيها فإنها تفعل ذلك كعملية ثانوية بعد أن يكون المنافس القوي قد أدى للنواة الخدمة الكبرى ؛بتخليصها من الجزء الأكبر من الطاقة بإطلاق نيوترون أو أشعة جاما،

مثال ذلك :التفاعل بين بروتون ونواة البورون فهو تفاعل تتكون عنه نواة مركبة من الكربون عددها الكتلي **12** وعددها الذرى **6** تتخلص هذه النواة من طاقتها الزائدة بإطلاق نيوترون، فيصبح عددها الكتلي **11** ويبقى عددها الذري كما هو ولذا تكتب 6ك **11**[7] وتعيش هذه النواة الجديدة **20** دقيقة ،ثم ينبعث منها بوزترون (إلكترون موجب) فتعود مرة أخرى إلى البورون (بو **11**) وهي نواة مستقرة.

الامتصاص الرنيني:

وكما أن للإلكترونات في مداراتها حول النواة مستويات معينة للطاقة ،فإن للنواة أيضاً مستويات معينة، وإذا أطلق نيوكلون نحو النواة بطاقة تتفق مع طاقة أحد المستويات، فإن احتمال دخوله واستقراره في النواة يكون كبيراً ،ويختلف الأمر هنا عنه في الطبيعة الكلاسيكية، فالقذيفة النووية تسلك مسلك الموجة ،فكما أن جهاز الراديو يلتقط الأمواج التي يعد لاستقبالها، وكما أن الشوكة ذات التردد المعلوم تحدث رنيناً مع أنبوبة صوتية ذات طول معين، فإننا نتحدث في الطبيعة النووية عن الالتفاف الرنيني ،حينما تكون طاقة القذيفة متفقة مع أحد مستويات الطاقة في النواة.

---

[7] 6ك **11** ترمز للسكربون الذي عدده الكتلى **11** وعدده الذري **6**.

النيوترون قذيفة نووية صائبة:

عندما أجرى "كوكوفت" و"والتن" تجربة على تفاعل البروتونات مع نواة الليثيوم ،وجد أن احتمال إصابة الهدف في مثل هذا التفاعل 1 إلى مليون ،والسبب في ذلك أن النواة هدف صغير يلزم أن تقطع القذيفة مسافة مائة مليون ذرة ،قبل أن تصيب نواة كما أن القذيفة الموجبة تتفاعل مع كثير من الإلكترونات السالبة في طريقها مما يفقدها الكثير من طاقتها، وفي كثير من الحالات تفقد القذيفة كل طاقتها بهذه الطريقة قبل أن يصادفها نواة، والسبب الثاني هو أن القذائف القليلة التي تجتاز العقبة الأولى سوف تصادف عقبة أخرى كبيرة ،هي قوة التنافر بين القذيفة، وبين شحنة النواة الموجبة ،واحتمال انحراف مسار القذيفة بناء على هذه القوة كبير.

إذا كانت هذه الأسباب تنصب أساساً على وجود شحنة موجبة على القذيفة، مما أدى إلى ضعف احتمال التفاعل، فما هي النتيجة إذا كانت القذيفة متعادلة الشحنة مثل النيوترون؟ لأنه لابد أن تنتظر أن يكون احتمال التفاعل أكبر، وهذه هي الحقيقة– فكل نيوترون يهدف نحو النواة يصيبها وتلتقفه ،فلا تفقد طاقته بواسطة الإلكترونات التي يصادفها في طريقه، ولا ينحرف بسبب التنافر بينه وبين النواة– ولذا يعتبر النيوترون قذيفة نووية صائبة.

ولذا فليس اكتشاف النيوترون ذا أهمية في معرفة تركيب النواة فحسب، بل يعتبر ذا أهمية كبرى كقذيفة صالحة للاستخدام عند مهاجمة النوى ولا سيما الثقيلة منها.

وتلعب طاقة القذائف النيوترونية دوراً كبيراً في هذه التفاعلات النووية، فإذا كانت طاقة القذيفة متفقة مع أحد مستويات الطاقة في النواة موضع الهجوم ،فإن القذيفة تستقر في النواة وتحدث فيها تغيراً.

أما إذا لم يكن هناك رنين بين طاقة النترو ومستويات الطاقة في النواة، فإن القذيفة النيوترونية ترتد ثانية ،ولذا فحظ النوى الثقيلة من التفاعل النووي مع قذائف النيوترونات أكبر من حظ النوى الحقيقية؛ نظراً لاحتوائها على مستويات كثيرة للطاقة وتؤدي النوى الخفيفة وظيفة المهدئ للنيوترونات عند اصطدامها بها، ولهذه الوظيفة أهمية كبيرة إلى جانب أهمية تفاعلات الالتقاف الرنيني فهي تلعب دوراً كبيراً في الطاقة الذرية.

عناصر ما وراء اليورانيوم:

عندما عرف أن مادة اليورانيوم بعد سلسلة من التحولات النووية تتحول إلى رصاص، تساءل العلماء عما إذا كان اليورانيوم نفسه حلقة في سلسلة تبدأ عند مادة ذات عدد كتلي أكبر بالرغم من عدم ظهور هذه المادة في الطبيعة؟ وأصبح من الواضح أن المواد الأثقل من اليورانيوم إذا كان لها وجود ،فإنها لابد وأن تكون قد تلاشت من دنيا الملاحظة

واختفت نهائياً ،وهذا ما دعا العالم الإيطالي فرمى في سنة 1934 لاكتشاف المواد فوق اليورانية التي يمكن أن تكون قد تلاشت منذ ألف مليون سنة تقريباً، فقد استطاع "فرمى" أن يقذف نواة اليورانيوم وبعض المواد الثقيلة بالنيوترونات ،وإذا كان العدد الكتلي لليورانيوم 238 والعدد الذري 92 فإن العدد الكتلي يزداد إلى 239 بعد امتصاص النيوترون، ثم ينبعث منه إلكترون فيظل العدد الكتلي 238 ويتحول العدد الذري إلى 93 إذ يتحول نترون على بروتون. ومعنى ذلك أن اليورانيوم يتحول بذلك إلى مادة أخرى تفوق اليورانيوم في عددها الذري ،وظهر من تجربة "فرمى" عدة نوى بعضها من العناصر فوق اليورانية المنتظرة ،والبعض الآخر لم يمكن التعرف عليه وحذت حذو "فرمى" في هذه التجربة عدة معامل في برلين وباريس ،واكتشفت نوى جديدة أكثر وأصبح الموقف أكثر تعقيداً.

الانشطار:

وفي سنة 1938 وجد الباحثون في باريس نواة تشبه في خواصها عنصر (اللانثانام) وهو عنصر عدده الذرى 57 وهو عدد أقل من عدد اليورانيوم ،وهذا مما يزيد الموقف تعقيداً.

وفي برلين أعاد هان واشتراسمان التجربة ،ووجدا أن إحدى النوى الناتجة يشبه الراديون الذي عدده الذرى 88 ،وهذا أمر غريب؛ إذ عندما يتحول عدد اليورانيوم من 92 إلى 88 يلزم أن يفقد اليورانيوم جسمين من جسيمات ألفا، ولكن جسيمات ألفا لم تكتشف خلال

التجربة، وعندما اتجه البحث إلى الفصل الكيماوي وجد أن المادة المشعة التي قيل عنها إنها الراديوم ليست إلا مادة الباريوم وعددها الذرى 56، ولما كان وزن ذرة الباريوم يزيد قليلاً عن نصف وزن ذرة اليورانيوم فليس لهذه المشكلة غير حل واحد ،وهو أن ذرة اليورانيوم لابد أن تكون قد انشطرت شطرين، وهذا هو ما تحقق بالتجربة إذ ثبت أن نواة اليورانيوم إذا أًابتها قذيفة نترونية، فإنها تنشطر شطرين متساويين تقريبا، وسمى ذلك بالانشطار النووي وهو يختلف عن التفاعلات النووية الأخرى.

النواة وقطرة الماء

وعندما نشر هذا البحث في سنة **1939**، سارع "فريش" و"مايتنر" وكانا قد غادرا ألمانيا النازية في ذلك الوقت، إلى بيان أهمية هذا التفاعل وشرحا كيفية حدوثه وبينا أن تكسر النواة الثقيلة إلى قطعتين متساويتين تقريباً،

يحقق فكرة "بوهر" عن تركيب النواة التي أدت إلى تشبيه النواة بقطرة السائل، فقطرة الماء متماسكة بسبب وجود قوى تحاول جعل سطح الماء أًغر ما يمكن ،مما يؤدي إلى تكوين القطرة الكرية ،كذلك نوى الذرة مجموعات متماسكة من الجيمات ممسوكة بعضها مع بعض، بواسطة قوى التبادل النووية، ولذا فالنواة قريبة الشبه من قطرة الماء الصغيرة، ويلاحظ أن قطرات الزئبق الصغيرة أقرب ما تكون إلى الكرة ،بينما إذا إتحدت قطرات الزئبق الصغيرة كونت حجماً كبيراً يزداد تفرطحا كلما كبر، والسبب في ذلك أن قوى الجاذبية الأرضية تؤثر على قوى التجاذب داخل القطرة؛ مما يؤدي إلى هذا الشكل المفرطح، وفي النواة تكبر قوى التنافر بين البروتونات المشحونة داخل النواة ،كلما زاد عددها كبر حجم النواة ،وهذا هو السبب في أن النوى الثقيلة تحتاج إلى أن يكون عدد النترونات فيها أكبر من عدد البروتونات، وكما أن لحجم القطرة حدوداً فإن حجم النواة كذلك يجب أن يكون محدوداً، فلا يجب أن يزيد العدد الذري عن **100** وهذا يتفق مع ما سبق أن بيناه ،من أن النوى

التي يزيد عددها الذري عن **83** (البزموث) هي نوى ذات فعالية إشعاعية لأنها كبيرة.

ومن أوجه الشبه بين النواة والقطرة: أن القطرة يتبخر بعضها إذا زوجت بطاقة معينة، وكذلك النواة ينبعث منها جسيم أو شعاع من أشعة جاما إذا أصابتها قذيفة نووية.

وقد بينت الآنسة "ماتيز" و"فريش" أن قطرة الماء إذا زودت بطاقة معينة فإنها يمكن أن تنفعل بطريقة أخرى، فيمكن أن تتكسر إلى قطرتين صغيرتين أقرب إلى الشكل الكرى من القطرة الكبيرة، وهذا التكسر أقرب ما يمكن إلى الانشطار الذي يحدث في دنيا النواة ؛ومعنى ذلك أن الانشطار عملية يمكن أن تحدث فقط في النوى الثقيلة والأقل استقراراً، وهذا هو حقيقة ما ثبت بالتجربة فقد اتضح أن أثقل المواد وهي الثوريوم والبروتوا كتينوم واليورانيوم ذوات العدد الذري **90**، **91**، **92** هي المواد التي يحدث فيها الانشطار.

سرعة انتشار بحوث الانشطار في أوائل الحرب العالمية الثانية:

وما لبث البحث الذي نشره "هان واشتراسمان" في يناير سنة **1939**، أن أحدث ضجة كبرى في الأوساط العلمية؛ لما له من أهمية فقد أعقبة نشاط علمي في جميع أنحاء العالم، وقد كان في ذلك الوقت الأستاذ "بوهر" في اجتماع علمي في واشنطن ،فتباحث مع زملائه الأمريكيين وبسرعة فائقة توالت التجارب ونشر **15** فبراير سنة **1939**، أربعة بحوث تؤيد ما

حصل عليه "هان وشتراسمان" من نتائج كما نشط العلماء في أوربا ،كذلك ونشر جوليوت في باريس نتائج مماثلة في 30 يناير سنة 1939 ،وكتب "فريش" مقالاً في إحدى المجلات الإنجليزية في 18 فبراير يصف ملاحظة الانشطار.

أهمية الانشطار النووي:

وتقع أهمية اكتشاف الانشطار فيما يصحبه من انطلاق طاقة غير عادية، فقد سبق أن اكتشف "آستون" في سنة 1919 جهازاً سمّي مطياف الكتلة ،أمكن بواسطته تعيين أوزان النوى المختلفة، وتبين من استخدام هذا الجهاز، أن أغلب العناصر تحتوي على نظائر، وأمكن قياس أوزان جميع النوى المعروفة وعرف أن وزن نواة معينة لا يساوى وزن مجموع البروتونات والنترونات الداخلة في تركيبها، فوزن بروتونين ونيوترونين في نواة الهليوم أكبر من وزن نواة الهليوم ،ويسمى فرق الوزن بنقصان الكتلة ،وهو يتحول إلى طاقة وبمقارنة الأوزان الذرية ،التي أمكن معرفتها باستخدام مطياف الكتلة، عندما يزيد وزن النواة من النوى الخفيفة إلى النوى الثقيلة، وجد أن الفرق بين وزن النواة ومجموع وزن مركباتها يزداد تدريجاً، وقد وجد أن نواة اليورانيوم تتكسر بالانشطار إلى شطرين مجموع وزنهما أقل من وزن نواة اليورانيوم، وينبعث نقصان الكتلة على هيئة طاقة هائلة، وقد أثبت "فرنيشن" و "جوليوت" أن هذه الطاقة تنبعث عند إصابة نواة اليورانيوم بالنترونات، ويبلغ الوزن الذري لحاصلات الانشطار نحو 140ـــ 90 ويمكن أن تنتج مجموعة من العناصر المختلفة

ما بين السلنيوم والانثانام ،وهذه الحاصلات الانشطارية ليست مستقرة ،وإنما هي نظائر مشعة تتحلل إلى شكل مستقر بعد أن تنبعث منها إلكترونات، ومعنى هذا أن الطاقة الناتجة لا تتحول كلها إلى طاقة حركة بل يستنفذ جزءاً منها في التحلل الإشعاعي.

رطل اليورانيوم: رحلة لإحدى السفن عبر الأطلنطي:

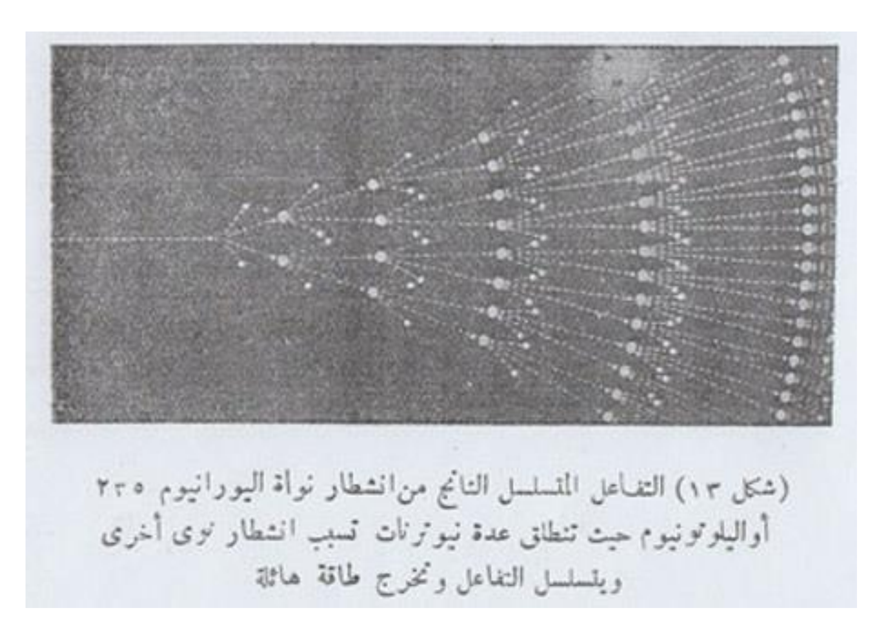
وفي سنة **1940** قيست طاقة قطع الانشطار، وعرف أن رطلاً من اليورانيوم يعطي طاقة قدرها **10** مليون كيلو وات ،ساعة بعد الانشطار وهذا يتفق مع الحسابات الخاصة بنقصان الكتلة، واتضح أن رطل اليورانيوم يكفى لتزويد سفينة كبيرة بالقوة لتعبر محيط الأطلنطي.

الانشطار المتسلسل:

في سنة **1939** اكتشفت "جوليوت" ومساعدته "هالبان وكوارسكس" أن انشطار اليورانيوم يتولد عنه فائض من النيوترونات ،وحقق هذا الاكتشاف أندرسون وآخرون في أمريكا ،وانبعاث عدد من النيوترونات من الانشطار يزودنا بمفتاح انطلاق الطاقة الذرية ،فإذا أمكن الاستفادة من فائض النيوترونات لإصابة قوى اليورانيوم لتنفجر، لنتج عن الانفجار عدد آخر من النيوترنات ،قادر على مهاجمة نوى اليورانيوم الأخرى، ويتسلسل التفاعل وتنطلق عنه طاقة هائلة.

القنبلة الذرية

كثيراً ما تحدث المتحدثون من وقتٍ لآخر قبل الحرب الأخيرة عن انطلاق الطاقة الذرية، ولو أن العلماء اعتبروا هذا الاحتمال بعيداً، إلا أن اكتشاف الانشطار في سنة **1939** ،قرب هذا الاحتمال وأوجد مجالاً للتفكير في محاولة إطلاق هذه الطاقة على نطاق واسع،



(شكل ١٣) التفاعل المتسلسل الناتج من انشطار نواة اليورانيوم ٢٣٥ أو البلوتونيوم حيث تنطلق عدة نيوترنات تسبب انشطار نوى أخرى ويتسلسل التفاعل وتخرج طاقة هائلة

فقد عرف أن اليورانيوم ينشطر إذا أصابته قذيفة نترونية، وعرف أن عدداً من النيوترونات ينطلق عقب هذا الانشطار، وعرف التفاعل المتسلسل، ولكن انفجاراً واحداً لم يحدث نتيجة التجارب التي أجريت على اليورانيوم في ذاك الوقت، ومعنى ذلك أن الانفجار يستلزم شروطاً

معينة ،ومن هذه الشروط أن يكون حجم اليورانيوم كبيراً نسبياً؛ بحيث يمنع النيوترونات من ترك المادة قبل حدوث التفاعل، وقد وجد بيران أن 40 طناً على الأقل من أكسيد اليورانيوم يلزم تواجدها كقطعة واحدة قبل أن يحدث التفاعل المتسلسل ،وكذلك يلزم أن يكون اليوارنيوم نقياً، كما وجد أن الحجم والنقاوة وحدهما غير كافيين لحدوث الانفجار ،فإذا جمعنا قطعة نقية من اليورانيوم حجمها يساوى حجم إحدى صالات السينما ،فإنها لا تنفجر إذا ما عرضت لتيار كبير من النترونات، والسبب في ذلك أنه ليس من الضرورى أن كل نيوترون يصيب نواة اليورانيوم يحدث انشطاراً.

وعندما بدأ "فرمى" تجربته سنة 1934 افترض أن نواة اليورانيوم 238 تلتقف النيوترونات الساقطة عليها، لتكون اليورانيوم 239، ودلت التجربة بعد ذلك على أن نواة اليورانيوم 238 تنشطر فقط إذا كان النيوترون الساقط عليها سريع الحركة ،أما النيوترونات ذات السرعة المتوسطة، فإنها تلتقف مكونة اليورانيوم 239 دون أن يحدث انشطار، وهذا هو ما وصفناه سابقاً بالالتقاف الرنيني.

النيوترونات البطيئة هي القذائف الفعالة لإحداث الانشطار:

ولكنه لوحظ أيضاً أن الانشطار يحدث عندما تكون النيوترونات بطيئة جداً، وفي أوائل سنة 1939 تمكن "بوهر"، "هويلر" من شرح هذه الظاهرة على أساس تحدث عند تفاعل النيوترونات البطيئة مع اليورانيوم 235 ،وفي سنة 1940 تمكن "نير" من جامعة منيسوتا من تحضير عينة

تحتوى على نسبة عالية من اليورانيوم 235 وحققت التجارب على هذه العينة نظرية "بوهر" و"هويلر".

والنيوترونات المنبعثة من الانشطار ذات طاقة عالية، وبعض هذه النيوترونات يمكنها أن تسبب انشطار نواة اليورانيوم 238 ،ولكن غالبيتها تلتقف مكونة اليورانيوم 239 وقليل منها يصادف نواة اليورانيوم 235، ويشطرها وأغلب الانشطار في اليورانيوم ينتج عن نوى اليورانيوم 235، ومما يضعف تسلسل الانشطار الامتصاص الرنيني للنيوترونات داخل نوى اليورانيوم 238، ولابد لتشجيع استمرار الانشطار التخلص من عمليات الالتقاف، وقد وجد أنه إذا خلط اليورانيوم بمادة خفيفة فإن كثيراً من النيوترونات تهدأ بالتصادم مع النوى الخفيفة ،بدلاً من التقافها بواسطة نواة اليورانيوم 338، ومن المواد التي تؤدى إلى تهدئة سرعة النيوترونات الماء الثقيل والكربون.

استبعاد إنتاج القنابل الذرية أول الأمر:

والقنبلة الانشطارية يجب أن تكون ذات حجم معين، وإذا بدأت القنبلة في الانفجار فإنها تنشطر وتنفصل حاصلات الانشطار، وبذا يصغر الحجم وينتهى التفاعل، ولمنع هذا يلزم أن يتم التفاعل بسرعة وينتهى قبل انفصال قطع الانشطار، ولما كانت تهدئة النيوترونات تستلزم بعض الوقت مما يؤدي إلى عدم إمكان حدوث الانفجار، فقد استنتج بالحساب أن الانفجار السريع كان مستبعداً على هذا الأساس، وكان هذا في رأي العلماء شيئاً جميلاً إذ توقعوا إمكان استغلال الطاقة الذرية في السلم

فقط، واستبعدوا استخدامها في الحرب، ولكن هذا الحلم الجميل لم يلبث أن انقشع واتضح في سنة **1940** أن اليورانيوم **235** لا ينشطر فقط بتأثير النيوترون البطئ ،ولكنه كذلك في بعض الأحيان ينشطر تحت تأثير النيوترون السريع، وبذا اتجهت الأفكار إلى شطر النيورانيوم المزود والذي يحتوي على نسبة كبيرة من اليورانيوم **235** ،أو الذي أزيل أغلب اليورانيوم **238** منه وقدر وزن القنبلة في ذلك القوت بما يتراوح بين كيلو جرام ومائة كيلو جرام ،وفي صيف سنة **1941** وكان معروفاً أن صناعة مثل هذه القنبلة ممكن، ويعتمد على توافر مادة اليورانيوم **235** وعلى إمكان فصلها من اليورانيوم الخام.

الحجم الحرج:

وإذا تم فصل مادة اليورانيوم **235** أصبح التعامل معها شديد الخطورة، فإن نيوترونا يقابل نواها يستطيع أن يسبب انشطارها، وما أكثر النيوترونات في الجو، وليس من الممكن حفظ المادة من أخطار النيوترونات، ولكن قطعة صغيرة من المادة لا خطر منها مهما تعرضت للنيوترونات ،إذ يساعد صغرها على هرب النيوترونات منها وعدم الاحتفاظ بها، ونيوترونات الانشطار الناتجة في هذه القطعة الصغيرة ،تستطيع أن تغادرها بسهولة دون إحداث انشطار، ولكن الخطورة أن تزداد قطعة اليورانيوم حجماً، ويلزم ملاحظة أن زيادة الحجم تعمل على الاحتفاظ بالنيوترونات داخل المادة ،مما يزيد في حجم التفاعل المتسلسل داخلها ؛حتى إذا وصل الحجم إلى ما يسمى بالحجم الحرج حدث

الانفجار، وهذا الحجم الحرج هو الحجم الذي لا يمكن أن توجد قطعة من اليورانيوم أكبر منه بينما الأحجام الأقل يمكن أن توجد، ويمكن تداولها بسهولة وكان لذلك من الضرورة حساب الحجم الحرج ومراجعته عملياً، ولكن التجربة العملية في غاية الخطورة؛ لذلك أجريت بعض التجارب باستخدام كمية من المهدئ ،ثم أجريت تجارب بكمية من المهدئ أقل ثم أجريت تجارب على إقلال كمية المهدئ ،لإمكان الوصول إلى معرفة الحجم الحرج.

تفجير القنبلة:

ولما كانت مداولة قطعة من اليورانيوم أقل من الحجم الحرج ممكنة، فقد وصل العلماء على أن تفجير القنبلة معناه إيجاد قطعتين من اليورانيوم ،مجموع حجمهما يزيد على الحجم الحرج ،وحجم كل منهما أقل من الحجم الحرج– ولا شك أن التفاعل يمكن أن يبدأ بمجرد اقتراب إحدى القطعتين من الأخرى، ولذا يلزم العمل على تقريبهما بعضهما من بعض ،بسرعة فائقة حتى يكون التفاعل أسرع، كأن تطلق إحدى القطعتين على الأخرى ،ويمكن الإقلال من الحجم الحرج إذا أحيطت بمادة عاكسة للنيوترونات، وللعاكس فائدة أخرى ،وهي الاحتفاظ بالمادة لمدة أطول مما يساعد على زيادة التفاعل وقوة الانفجار.

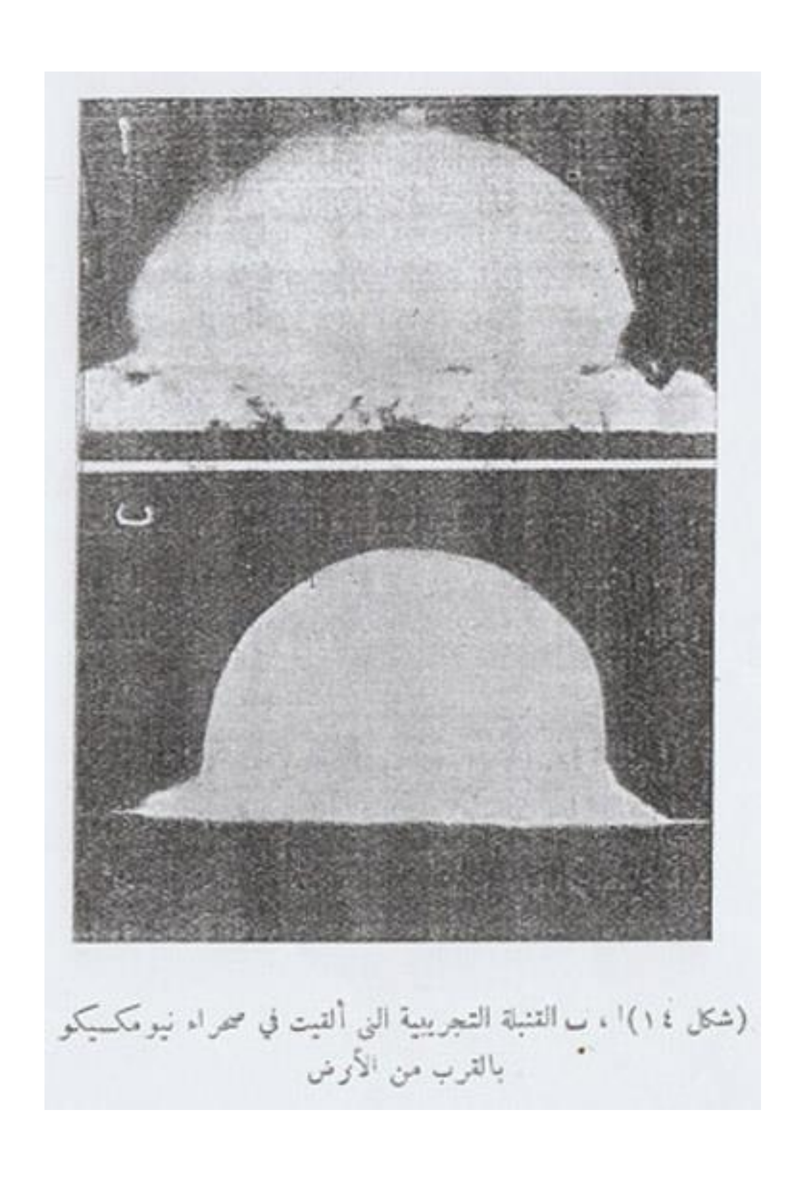
التجربة الأولى في صحراء نيومكسكو:

وقد جربت القنبلة الأولى في **16** يولية سنة **1945** في صحراء نيومكسكو، ولم تكن التجربة ناجحة، ولكن من شاهد التجربة يصف ظاهرة ضوئية شديدة نتجت من الحرارة الشديدة الناتجة من الانفجار.

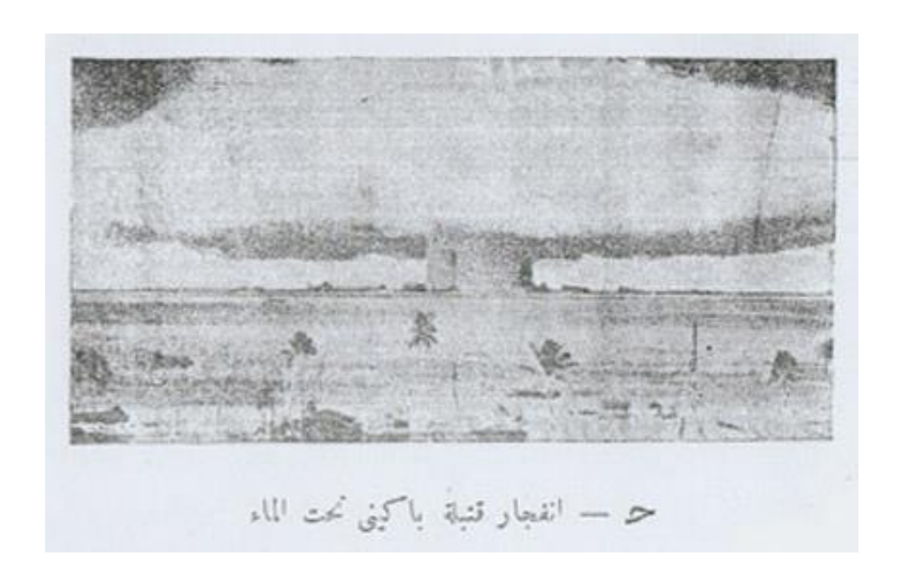
وفي لحظة الانفجار تكون الذرات شديدة السرعة ،ويكون مركز الانفجار شديد الحرارة ،وربما تصل الحرارة إلى ملايين الدرجات ويمكن أن تخرج الطاقة على هيئة إشعاعات كما في (شكل **14**).

قنبلة اليابان:

وقد اتضح من القنبلة التي ألقيت في اليابان ،أنها مسحت **10** أميال مربعة من المدينة مما يستلزم **2000** طن من المتفجرات العادية، ولكن تأثير الإشعاعات في هذه القنابل كبير، فتدل التقارير أن السكان الذين يعيشون في نطاق مئات الأمتار من الانفجار يحترقون ،ويصبح لونهم أسود كالفحم ،وبعد ذلك المدى يصاب السكان بحروق من الإشعاعات، وذلك علاوة على تأثير أشعة جاما التي تقتل الكرات البيضاء في الدم، وتحول دون إمكان تجلطه ؛مما يسبب النزيف المستمر خلال الجلد، وإتلاف الأنسجة، ونخاع العظام وهذه الأخطار تسبب الوفاة المتأخرة، وقد كان عدد الوفيات في هيروشيما نحو **100.000** نفس.



(شكل ١٤) أ ، ب القنبلة التجريبية التى ألقيت في صحراء نيومكسيكو بالقرب من الأرض



حـ — انفجار قنبلة باكينى تحت الماء

المفاعلات الذرية:

المفاعل النووى وسيلة يستخدم فيها الانشطار المتسلسل لإنتاج الحرارة والإشعاع والمواد المشعة، ويعتمد عمله على استخدام النيوترونات الحرارية ،وفي هذه الحالة يسمى ب"المفاعل الحراري" أو على استخدام النيوترونات السريعة التي تزيد طاقتها على مليون إلكترون فولت، وفي هذه الحالة يسمى بالمفاعل السريع. وتوجد أيضاً مفاعلات متوسطة ،تعتمد على استخدام نيوترونات طاقتها بضع مئات من الإلكترون فولت.

الحاجة إلى مهدئ:

يحدث الانشطار المتسلسل في اليورانيوم 235 نتيجة مرور النيوترونات فيها، ولكن الحجم الحرج يكون صغيراً ،عندما تكون النيوترونات بطيئة أو حرارية ،ويكون أكبر إذا كانت النيوترنات سريعة، والنيوترونات الخارجة نتيجة الانشطار تحمل طاقة تتراوح بين مليون ومليونين إلكترون فولت، واحتمال الانشطار نتيجة النيوترونات الحرارية يفوق النيوترونات السريعة أكثر من 13 مرة ،ومعنى ذلك أنه إذا مرت مجموعة من النيوترونات السريعة داخل اليورانيوم ،وسبب أحد هذه النيوترونات السريعة انشطاراً ،فإن مجموعة مماثلة من النيوترونات الحرارية تسبب ثلاثة عشر انشطاراً في المادة، ولهذا السبب يلزم تهدئة النيوترونات ؛ليكون مفعولها في الانشطار أقوى في اليورانيوم، وهذا المهدئ يوضع حول قلب المفاعل، وفي هذه الحالة يسمى المفاعل متغايراً أو يخلط بمادة اليورانيوم ويسمى حينئذ المفاعل متجانساً.

أجزاء المفاعل النووي:

يتكون المفاعل النووي أساساً من الأجزاء الآتية:

1- مادة قابلة للانشطار.

2- مهدئ (في المفاعلات الحرارية).

3- أجهزة للتحكم في معدل تقدم التفاعل المتسلسل.

4- وسيلة للتخلص من الحرارة المولدة عند تشغيل المفاعل.

5- درع واق من الإشعاعات المنبعثة من المفاعل.

6- وسيلة للتخلص من متخلفات الانشطار بين وقت وآخر.

المواد القابلة للانشطار:

يمكن استخدام إحدى المواد الآتية:

1- اليورانيوم 235.

2- البلوتونيوم 239.

3- اليورانيوم 233.

أما اليورانيوم 235 فيلزم للحصول عليه فصله من اليورانيوم الخام الذي يحتوي على نسبة 140/1 من اليورانيوم 235، بينما يحتوي على باقي النسبة من اليورانيوم 238 ،وطريقة الفصل تقتضي تكاليف كبيرة، ولا تملك أجهزة الفصل إلا الدول الكبيرة مثل الولايات المتحدة والاتحاد السوفيتي والمملكة المتحدة، ويستخدم عادة اليورانيوم المزود الذي يحتوى على نسبة أعلى من اليورانيوم 235 ،ويحصل عليه صناعياً ويمكن استخدام اليورانيوم الخام في المفاعل، وفي هذه الحالة تتخذ كمية كبيرة منه تبلغ عشرات الأطنان، ويتخذ الماء الثقيل أو الكربون كمهدئ، وعند تشغيل المفاعل باستخدام اليورانيوم تتحول مادة اليورانيوم 238 إلى بلوتونيوم 239 ،وهذا يمكن فصله كيماوياً ،واستخدامه كوقود في مفاعل آخر ويمكن الحصول على اليورانيوم 233 ،باستخدام الثوريوم 232 الذي إذا إصابته قذيفة نيوترونية تحول

إلى ثوريوم 233 وهو مادة قصيرة العمر، عمر نصفها يبلغ 23 دقيقة وتتحول إلى بروتاكتينوم 233 بعد أن ينفصل منه جسيم بيتا ،ثم يتحول البروتا كتينوم إلى يورانيوم 233 بعد أن ينفصل منه جسيم بيتا آخر.

ومن هذا يتضح أن المادة الأساسية للطاقة الذرية هي اليورانيوم 235 ؛نظراً لتواجدها في الطبيعة أما المادتان الأخريان– البلوتونويوم 239، اليورانيوم 233 ،فهما مادتان صناعيتان تليان المادة الأساسية، ولو أنهما قد تفوقانها في الاستخدام ،وهما مستخدمتان في الوقت الحاضر والمستقبل لهما.

المهدئ:

اختبار مادة المهدئ محدود بشروط معينة، فلابد أن تكون مادة خفيفة؛ لأن من شروط التهدئة إجبار النيوترون على فقد كمية كبيرة من طاقته عند اصطدامه بالمادة ،وهذا لا يحدث عندما يصطدم النيوترون بنواة ثقيلة ،ويلزم أن يكون المهدئ على شكل سائل أو صلب حتى يمكن أن يوضع في مكان مناسب، وتعتمد كفاءة المهدئ على قدرته على تخفيض طاقة النيوترون بالتصادم المرن إلى الطاقة الحرارية ،لتزداد قدرته على إحداث الانشطار، كما يعتمد على قدرته على التقاف النيوترون للإقلال من عدد النيوترونات.

وفقد الطاقة بواسطة التصادم المرن يتأثر بعوامل ثلاثة:

1– مقدار الطاقة المفقودة عند التصادم.

2- احتمال التقاف النيوترون بواسطة المهدئ.

3- احتمال استطارة النيوترونات بواسطة نواة المهدئ.

أما العامل الأول فيعتمد فقط على خفة المهدئ، ولذا يختار المهدئ دائماً من بين المواد الخفيفة، ولكن احتمالات الالتقاف والاستطارة فيلزم معرفتها بالتجربة ،ومن المواد المستخدمة كمهدئ في المفاعلات: الماء العادى والماء الثقيل والكربون والمواد المقبولة لتأدية هذا الغرض هي البربليون والأكسجين، ويجرب في الوقت الحاضر استخدام المهدئات العضوية.

أجهزة التحكم:

يعبر عن معدل نمو التفاعل الانشطاري المتسلسل بثابت التكاثر "ث".

$$\frac{2}{1}$$

لنفرض إما في لحظة معينة وجدنا أن عدد النيوترونات الداخلة في تفاعل نووى= ن1،ولنفرض أننا في لحظة أخرى، بعد أن حدث الانشطار، وبعد أن حدث التفاف وهروب لعدد من النيوترونات، وانضم إلى المجموعة عدد آخر ناتج من الانشطار، وكان عدد النيوترونات في هذه اللحظة ن2 حينئذ.

يمكن القول بأن ثابت التكاثر

وهذا يمثل الزيادة أو النقصان من جيل إلى جيل في عدد النيوترونات، فإذا كانت ت أكبر من 1، فإن التفاعل المتسلسل يتباعد ويتزايد عدد النيوترونات زيادة مطردة، أما إذا كانت ت أقل من 1، فإن التفاعل لا يلبث أن ينتهي.

لنأخذ مثلاً ت=1.002 في هذه الحالة تتوالد النيوترونات نحو 1000 مرة في جزء صغير من الثانية، وتصبح نسبة عدد النيوترونات 7.4 وينمو التفاعل نمواً كبيراً، ويلزم وجود وسيلة سريعة وفعالة للتحكم في عامل التوالد، والطريقة العادية هي وضع عدة عصي من الكادميوم أو الصلب المحتوى لقليل من البورون في المفاعل؛ حيث الكادميوم والبورون تمتص النيوترونات وتساعد على تقليل عددها، وإذا كانت ت قريبة من الوحدة فإن النيوترونات المتأخرة تمثل الزيادة في العدد من جيل إلى آخر، وفي هذه الحالة يكون لدى أجهزة التحكم الفرصة للعمل.

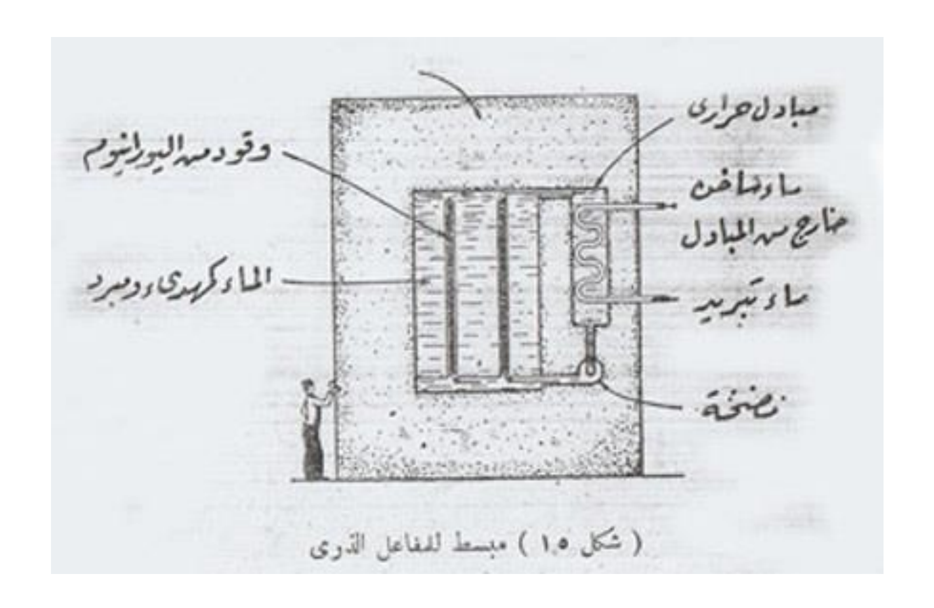
تركيب المفاعل:

وأول مرحلة في تركيب المفاعل: هي وضع المهدئ وعصى التحكم والدروع الواقية، ثم يضاف الوقود النووى تدريجياً ،إلى أن يزيد تدفق النوترونات داخل المفاعل دليلاً على بدء التفاعل المتسلسل ،ويسمح بالتفاعل إلى أن تصل درجة الحرارة إلى النهاية العظمى المسموح بها، ثم يصير إدخال عصي التحكم إلى أن تصل (ت) إلى الوحدة ،ويلزم حينئذ أن يكون التحكم تلقائياً ؛بحيث تقابل زيارة فيض النيوترونات أو نقصها

داخل المفاعل حركة من عصي التحكم داخل أو خارج المفاعل لتحافظ على توازنه أنظر شكل 15.

التبريد:

وجد أن استهلاك جرام واحد من اليورانيوم 235 في اليوم يكفى لإنتاج 1000 كيلووات بصفة مستمرة، ولكن لو لم تتخذ الوسائل اللازمة للتبريد، فإن المفاعل يتحلل نتيجة لارتفاع درجة الحرارة، والطريقة العادية لإزالة الحرارة الزائدة: هي إمرار سائل مبرد داخل المفاعل ،ويلزم للمبرد ألا يلتقف النيوترونات أو يتحلل بواسطتها ،ويلزم أن تكون له صفات خاصة مثل :حرارة نوعية عالية، وموصلية حرارية عالية، ودرجة غليان عالية ،إذا كان سائلاً، ويمكن استخدام الهواء، وأهم عيوبه هو أنه يحتوي نحو 1% من الأرجون، وغاز الأرجون يصبح مادة مشعة عند تصادمه مع النيوترونات ،ويشع جسيمات بيتاً وأشعة جاما وعمر نصفه 110 دقيقة. ومخلفات الهواء من المفاعل تدفع خلال مدخنة عالية؛ لتفادى زيادة تركيز الهواء بهذا الأرجون المشع بالقرب من سطح الأرض ،والماء مبرد مناسب ويفوق الهواء إلا أنه محدود بدرجة غليان منخفضة.



(شكل ١٥) مبسط للمفاعل الذرى

الدرع الواقي:

تنتج من التفاعل المتسلسل كميات كبيرة من أشعة جاما والنيوترونات ،ويلزم حفظها من الخروج إلى الهواء ،ومدى أشعة جاما ينحصر بين 1، 5 مليون إلكترون فولت وتستخدم حواجز الخرسانة بكثافات مختلفة كدروع واقية ،نظراً لرخص سعره وسهولة تشكيلة. ويتخذ الماء وحواجز الخرسانة دروعاً للوقاية من أشعة جاما ومن النيوترونات ،ومن المستحسن إضافة كمية من الحديد أو كبريتات الباريوم للخرسانة لزيادة كثافتها، ويمكن بهذه الطريقة رفع كثافتها إلى 4.5 جرام في السنتيمتر المكعب.

إزالة نواتج الانشطار:

بعد تشغيل المفاعل مدة من الزمن يتحول جزء من اليورانيوم 235 إلى مواد انشطارية مختلفة ،وجزء من اليورانيوم 238 إلى بلونوثيوم 239

وبعض هذه النواتج الانشطارية لها القدرة على امتصاص النيوترونات ،وإذا لم يتم التخلص منها ساعدت على الإقلال من عامل التكاثر؛ بحيث يقل عن الواحد مما يساعد على إبطال التفاعل المتسلسل ،ولذا يلزم فصل النواتج المختلفة من اليورانيوم، وهذه العمليات جميعها يلزم إجراؤها خلف حوائط خرسانية، ويلزم استخدام الأيدى الميكانيكية والتحكم فيها عن بعد في جميع مراحلها.

أنواع المفاعلات:

أنواع المفاعلات مختلفة وتقسيمها يعتمد على عدة نواح ،فهى تقسم بالنسبة إلى طبيعتها ،أو إلى تركيبها ،أو إلى استخدامها، فإذا راعينا طبيعتها فهى أنواع ثلاث ،وتقسم بالنسبة إلى طاقة النيوترونات الخارجة منها إلى الأقسام الآتية:

1- مفاعلات سريعة.
2- مفاعلات متوسطة.
3- مفاعلات حرارية (بطيئة).

وبالنسبة لتركيب الوقود والمهدئ تقسم قسمين:

1- مفاعلات متجانسة: وفيها يوزع الوقود توزيعاً منتظماً في المهدئ مثال ذلك :أملاح اليورانيوم تذاب في الماء أو الماء الثقيل.
2- مفاعلات متغايرة :ويتكون الوقود من قضبان موزعة بطريقة منظمة داخل المهدئ، وبالنسبة للوقود فهي أنواع أربعة.

1. مفاعلات اليورانيوم الطبيعي ويحتوى على 0.7% من اليورانيوم 235 والباقي يورانيوم 238.
2. مفاعلات اليورانيوم المزود وتحتوى على نسبة أعلى من 0.7% من اليورانيوم 235،
3. مفاعلات البلوتونيوم 239.
4. مفاعلات اليورانيوم 23.

وبالنسبة للمهدئ أنواع ستة:

1- مفاعلات الجرافيت.
2- مفاعلات الماء الخفيف.
3- مفاعلات الماء الثقيل.
4- مفاعلات البريلثيوم.
5- مفاعلات أكسيد البريليوم.
6- المفاعلات العضوية.

وبالنسبة للمبرد فهي ثلاثة أنواع:

1. المفاعلات المبردة بالغازات أو الهواء.
2. المفاعلات المبردة بالماء.
3. المفاعلات المبردة بالمعدن المال.

وإذا راعينا الغرض الذي من أجله أنشئ المفاعل قسمنا أنواعه ثلاثة أقسام:

1- مفاعلات أبحاث.

2- مفاعلات إنتاج الوقود النووي.

3- مفاعلات لإنتاج القدرة الكهربائية.

دورة الوقود:

عندما نشر "هان"، و"اشتراسمان" نتائجهما عن الانشطار وعن الحصول على مادة الباريوم من اليورانيوم عرف أن نواة اليورانيوم انشطرت إلى قطعتين: إحداهما الباريوم ولما كان اليورانيوم الطبيعى نوعين العدد الكتلي للأول **235** وللثاني **238** فيلزم أن نتتبع ما يحدث للنوع الثاني كما تتبعنا الانشطار في النوع الأول.

اليورانيوم **238** يميل إلى الاحتفاظ بالنترون ،الذي يصيبه متحولاً إلى يورانيوم **239** ،وقد أجريت عليه عدة تجارب ،واكتشف نتيجة لهذه التجارب عنصران من العناصر فوق اليورانية وهما النيتونيوم والبلوتونيوم ،وعرف أن نواة البورانيوم **239** نواة غير مستقرة عمر نصفها **23** دقيقة ينبعث منها إلكترون وتتحول إلى مادة عددها الذري **93** تسمى النيتونيوم ،ولا تلبث أن ينبعث منها إلكترون آخر، وتتحول إلى نواة البلوتونيوم **94** ومادة البلوتونيوم من المواد الذرية الهامة فهي فردية العدد الكتلي (**239**) ،وتشبه إلى حد كبير اليورانيوم **235** من ناحية قابليتها للانشطار.

وجاءت التقارير في سنة **1941** تفيد أنه إذا حدث تفاعل متسلسل في مادة اليورانيوم الخام فإن ذلك يؤدى إلى تكوين مادة البلوتونيوم بكميات يعتد بها، وهذه المادة الجديدة يمكن فصلها كيماوياً ،وهي تؤدى عمل مادة اليورانيوم **235** لأغراض الانشطار، وهذا معناه أن مادة اليورانيوم **238** أصبحت أيضاً مادة ذات قيمة من ناحية إنتاج الطاقة الذرية ؛لأنها تتفاعل لإنتاج البلوتونيوم القابل للانشطار، مما يؤدى إلى زيادة الوقود الذرى إذ نسبة اليورانيوم **238** إلى اليورانيوم **235** تساوى= **140**: **1**.

ومن فوائد اكتشاف مادة البلوتونيوم إمكان تحضير وحدات ذرية لإنتاج القوى تزن نحو **50** كيلو جرام بدلاً من عشرات الأطنان عند استخدام اليورانيوم الطبيعي.

وإذا وجد البلوتونيوم بكميات كبيرة فإن التفاعلات المتسلسلة باستخدام النيوترونات السريعة تكون ممكنة، وفي هذا التفاعل يمكن إطلاق الطاقة بمعدل كبير يعادل سرعة الانفجار.

ومادة البلوتونيوم يمكن اعتبارها مادة قابلة للانفجار النووي تمكننا صفاتها من فصلها كيماوياً بدلاً من فصل اليورانيوم **235** من الورانيوم الطبيعي بطرق مكلفة، وعند بناء المفاعل اقترح الخبراء استخدام مهدئ الكربون على شكل قوالب من الجرافيت توزع بينها قطع اليورانيوم واختير حجم قطع اليورانيوم ؛بحيث تخرج منها النيوترونات السريعة إلى المهدئ وبوعد بين قطع اليورانيوم بما يسمح بحدوث **200** اصطدام

للنيوترون مع المهدئ قبل أن يصيب قطعة اليورانيوم الأخرى، وهذا يؤدى إلى نقصان سرعة النيوترون فلا تلتقفه نواة اليورانيوم **238** ولكنه يتحرك داخل المفاعل حتى يصادف نواة اليورانيوم **235**.

وللحصول على الأبعاد الصحيحة والبيانات اللازمة بنيت بعض المفاعلات الصغيرة، وأجريت عدة تجارب، واستخدمت عصي التحكم من معدن الكاديوم لامتصاص فائض النيوترونات ،وكانت التجربة في ذلك الوقت من أصعب الأمور، فبنى المفاعل صغيراً ،وقيس فيض النيوترونات الناتجة من الانشطار مع زيادة الحجم تدريجياً إلى أن تم الوصول إلى الحجم الحرج، وفي كل حالة يزداد حجم المفاعل يزداد حجم عصي التحكم ؛بحيث يسهل التحكم في الطاقة الناتجة بتحرك العصي– ولوحظ أن بعض النيوترونات لا تظهر إلا مؤخراً بعد الانشطار ببضع ثوان تصل إلى ستين ثانية من حدوث التفاعل، ومن مميزات هذه النيوترونات المتأخرة أنها تسمح بالتغير التدريجي في إنتاج القدرة التي تعقب كل وضع جديد من أوضاع عصا التحكم، وفي المفاعل الأول ثبت منظم تلقائي لإدخال عصا التحكم في المفاعل كلما زاد مستوى القدرة على المطلوب ،وكان من الممكن إقفال المفاعل إذا أدخلت فيه عدة عصي من الكادميوم ،وكانت قدرة المفاعل الأول نصف وات وزيدت هذه القدرة إلى **200** وات بعد عشرة أيام ،وإذا تم تشغيل المفاعل بهذه القدرة لإنتاج البلوتونيوم فإنه يلزم له نحو **100.000** سنة ؛لإنتاج ما يكفي لصنع قنبلة ذرية واحدة ولكن تصميم هذا المفاعل لم يسمح بزيادة قدرته عن ذلك.

وحدث تطور في التصميم في المفاعل الثاني الذي بدئ تشغيلة في نوفمبر 1943، فجعل اليورانيوم على هيئة قضبان وجعل المفاعل كله على شكل مكعب، وكانت قدرته 800 كيلو وات ثم زيدت إلى أكثر من 1800 كيلووات، وأمكن الحصول من هذا المفاعل على بضعة جرامات من البلوتونيوم من كل طن يورانيوم كل يوم وبمرور الزمن يزداد فقد نوعي اليورانيوم 235: 238 إلى أن يأتي وقت تصبح فيه كمية اليورانيوم 235 غير كافية وتظهر كمية من البلوتويوم وتظهر كذلك في الوقود شوائب من القطع الانشطارية تحدث له تسمما مما يستلزم إيقاف المفاعل وتزويده بوقود جديد.

دورة اليورانيوم المزود:

تبدأ هذه الدورة باليورانيوم المزود بالنظير 235 ويمكن الحصول على نسب مختلفة منه ما بين 1%: 99% ،وإن كان الوقود في هذه الدورة يتكلف مصاريف باهظة لما تتكلفه أجهزة فصل اليورانيوم ،فإن الميزات التي يحصل عليها في صغر حجم المفاعل والتصميم تجعله مناسباً في البلاد التي تنتج هذا النوع من الوقود وفي الجدول الآتي بيان لبعض الكميات المستخدمة في مفاعلات معينة:

جدول (1)

مكان المفاعل	قدرته الحرارية	نسبة تزويد اليورانيوم	الكتلة الحرجة	تحميل القلب بالوقود
أول مفاعل قوى الاتحاد السوفيتي 1954	30 ميجاوات	%5	12.8 كجم يورانيوم 235	550 كجم من اليورانيوم المزود
درسدن (أمريكا) 1960	626ميجاوات	%1.5	40.5كجم يورانيوم 235	62 طن ثاني أكسيد البورانيوم
مل أرجون (أمريكا) 1956	200ميجاوات	%1.44	47.1كجم يورانيوم 235	5.6 طن يورانيوم طبيعي
مينيسيوتا (أمريكا) 1961	58ميجاوات	%93	127كجم يورانيوم 235	يورانيوم 235 (76.4

				كجم)
كال (ألمانيا) 1960	60ميجاوات	%3.6	20كجم يورانيوم 235	20.9 كجم أكسيد يورانيوم 6.5
الشاص (الجمهورية العربية المتحدة) 1961	2ميجاوات	%10	4كجم يورانيوم 235	ثاني أكسيد يورانيوم 60 كجم

وبدراسة هذه الدورة نجد أن نسبة اليورانيوم **238** قليلة نسبياً إذ نسبة اليورانيوم **235** كبيرة ،ولهذا السبب يقل في هذه المفاعلات نسبة البلوتونيوم المنتجة كما تزيد قيمة الاحتراق ،ويمكن في تصميم هذا النوع من المفاعلات استخدام الماء العادي كمهدئ ومبرد مما يقلل تكاليف الإنشاء.

2ـ دورة اليورانيوم الطبيعي:

وعندما يستخدم اليورانيوم الطبيعي كوقود يلزم استخدام كمية كبيرة منه تبلغ عشرات الأطنان كما في جدول (2) ،وفي أثناء التشغيل يحترق

جزء من اليورانيوم **235** وهو النظير الذي يحدث فيه الانشطار، ويتحول اليورانيوم **238** إلى بلوتونيوم **239** ،وفي هذه الأنواع من المفاعلات تكون درجة الاحتراق أقل منها في مفاعلات اليورانيوم المزود ،والسبب في ذلك التأثير الإتلافي للإشعاع على الوقود ،وكذلك التسمم الذي يحدث نتيجة لتراكم نواتج الانشطار، وفي هذه المفاعلات يكون معدل إعادة معالجة الوقود المحترق أكبر منه في النوع الأول.

جدول (**2**)

مكان المفاعل	قدرة المفاعل الحرارية	المهدئ	المبرد	الكتلة الحرجة	تحميل القلب بالوقود
أو نتاريو (كندا) **1961**	**83.3** ميجاوات	**22** طن ماء ثقيل	ماء ثقيل	**4770** كجم	**15** طن يورانيوم
ستوكهولم (السويد) **1961**	**65** ميجاوات	ماء ثقيل	ماء ثقيل		**18** طن أكسيد يورانيوم
بركلي (إنجلترا) **1961**	**557** ميجاوات	جرافيت	ثاني أكسيد الكربون	**35** طن	**213** طن يورانيوم

برادول (إنجلترا) 1961	531 ميجاوات	جرافيت	((	29.5 طن	237 طن يورانيوم
كولدرهول (إنجلترا) 1959	180 ميجاوات	جرافيت	((	31 طن	127 طن يورانيوم

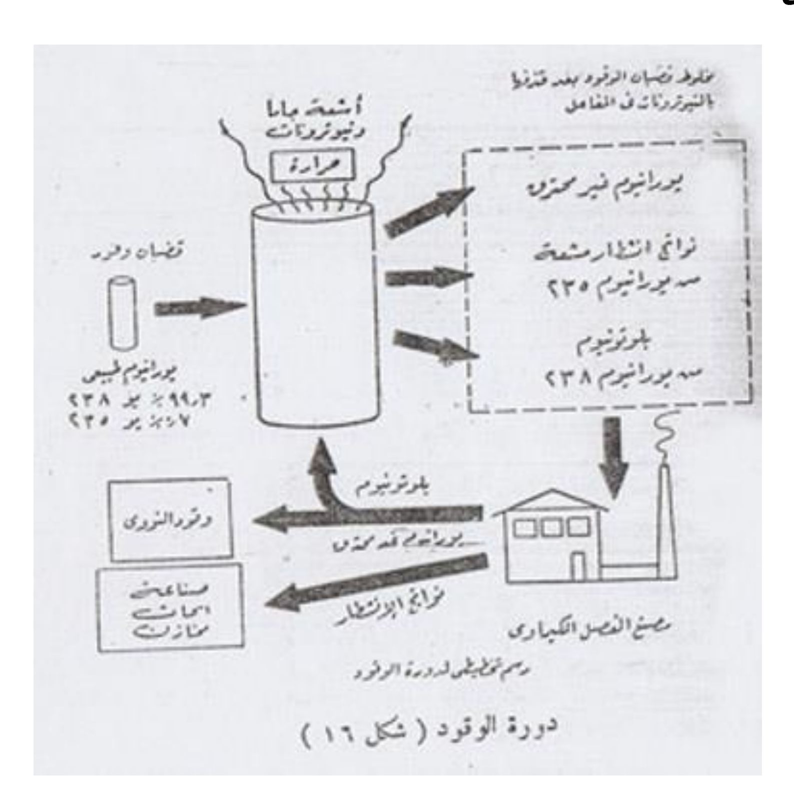
ولما كان البلوتونيوم في هذه المفاعلات يعتبر من أهم نواتجها فيلزم فصله لاستخدامه كوقود لمفاعل جديد ،ويمكن إعادة البلوتونيوم للمفاعل نفسه بعد إعادة معالجته لتعويض المحترق ،والبلوتونيوم يستخدم علاوة على ذلك وقوداً للمفاعلات السريعة أو في مفاعلات الثوريوم وشكل (16) يوضح دورة الوقود في مفاعلات اليورانيوم الطبيعي.

3ـ دورة الثوريوم:

ذكرنا أن المواد الانشطارية هي اليورانيوم 235 والبلوتونيوم 239 واليورانيوم 233 وقد سبق الحديث عن دورة اليورانيوم 235 والبلوتونيوم 239 وأما اليورانيوم 233 فهو كما ذكر سابقاً يتولد من الثوريوم 232.

والثوريوم أكثر انتشاراً من اليورانيوم في العالم ويربو باحتياطيه على ثلاثة أضعاف احتياطي اليورانيوم، ويمكن توليد اليورانيوم 233 من

الثوريوم في مفاعلات حرارية يوضع فيها الثوريوم كدثار، ويتحول تدريجياً إلى يورانيوم 233 ويستخدم اليورانيوم 235 أو البلوثونيوم كوقود لهذه المفاعلات، وبعد معالجة الوقود المحترق يمكن فصل اليورانيوم 233 واستخدامه في مفاعلات أخرى، وجدول (3) يحتوى على أمثلة من هذه المفاعلات:



دورة الوقود (شكل ١٦)

جدول (2)

مكان المفاعل	قدرة المفاعل الحرارية	المهدئ	المبرد	الكتلة الحرجة	تحميل القلب بالوقود
نيويورك (أمريكا) 1960	585 ميجاوات	ماء خفيف	%90	6 05 كجم أكسيد يورانيوم 235	1.2 طن أكسيد يورانيوم 235+ 18 طن أكسيد نورانيوم
مينيسونا (أمريكا) 1961	58.2 ميجاوات	ماء خفيف	%93	127 كجم يورانيوم 235	209 كجم أكسيد يورانيوم 4.5 طن أكسيد ثورانيوم

مفاعلات القوى

منذ أن أمكن استئناس الطاقة الذرية والعالم يتجه إليها كوسيلة لسد حاجته المتزايدة من الطاقة على مر السنين، تلك الحاجة التي ينتظر أن تعجز عن سدّها الوسائل المتعارف عليها مثل حرق الفحم والزيت،

واعتبر نجاح الإتحاد السوفيتي في إنشاء محطة قوى نووية سنة **1955** نصراً عالمياً كبيراً ،وأعدت البرامج في الدول المختلفة، وتم في السنوات الثلاث التي أعقبت إنشاء المفاعل السوفيتي إنشاء ما لا يقل عن ثلاثة عشر مفاعلاً نووياً من مفاعلات القوى لتوليد الكهرباء والاستفادة بها عملياً، من تلك المفاعلات ثلاثة في "كالدار هدل" (إنجلترا) ،وثمانية في الولايات المتحدة وواحد في الإتحاد السوفيتي وآخر في فرنسا والقوة الكهربائية الناتجة من تلك المفاعلات لا تقل عن مائتي ميجاوات ،وأعطت هذه المحطات فعلاً طاقة قدرها بضع مئات ملايين كيلووات ساعة في سنتي **1957**، **1958**.

ويشمل برنامج المملكة المتحدة البريطانية إنشاء محطة قوى نووية في "برادول" على بعد خمسة وأربعين ميلاً من لندن قدرها **300** مليون وات، ومحطة أخرى قدرها **275** مليون وات في "بركلي" بين بريستول وجلوستر (انظر جدول **2** في الباب السابع) ومحطة ثالثة في "هنترستون" بالقرب من جلاسجو قدرها **300** مليون ورابعة في هنكلي قدرها **500**

مليون ،وجميع هذه المحطات تعتمد على اليورانيوم الطبيعي كوقود والجرافيت كمهدئ وثاني أكسيد الكربون كمبرد، ويرى الخبراء البريطانيون أن إنتاج الكهرباء من محطة هنكلي سيكون من الناحية الاقتصادية، كإنتاجها في بريطانيا من المحطات التي تعتمد على وقود الفحم في المناطق النائية، أما الولايات المتحدة فيشمل برنامجها إنشاء محطة قدرتها **275** مليون وات في شمال نيويورك، وعلى بعد **24** ميلا منها يستخدم منها مخلوط من الثوريوم واليورانيوم كوقود ،كما يستخدم الماء المضغوط كمبرد ويشمل برنامجها أيضاً محطة أخرى قدرتها **130** مليون وات في ماساشوستس ،والثالثة تقام في درسدن قدرتها **180** مليون، والرابعة في دترويست ومفاعلها من النوع السريع الذي يستفاد منه في إنتاج الوقود الصناعي، وفي الإتحاد السوفيتي تقام محطة وقودها اليورانيوم المزود والمهدئ الجرافيت والمبرد هو البخار ذو الضغط العالي وقدرة هذه المحطة **400** مليون، كما يجرى إنشاء محطتين أخريين تعتمدان على وقود اليورانيوم المتردد (**1.5%**) قدرة كل منها **210** مليون ،وذلك علاوة على مفاعلات قوى صغيرة تستخدم في المناطق التي لا توجد فيها مصادر أخرى للطاقة.

وتتخصص كندا في بناء محطات القوى التي يستخدم فيها الماء الثقيل كمهدئ واليورانيوم الطبيعي كوقود.

وتهتم فرنسا بإنتاج البلوتونيوم علاوة على إنتاج القوى ،وتستعين إيطاليا بالبنك الدولى لإقامة محطة نووية لتوليد الكهرباء في الجنوب وهي

على نمط كالدرخول ،كما تنشئ محطة أخرى على نمط محطة درسدن الأمريكية.

أما الهند فتهدف إلى التحول في مدى خمس عشر سنة إلى وقود اليورانيوم 233 للانتفاع بما لديها من مونازيت يستخدم ما به من الثوريوم في إنتاج قدرة كهربائية لا تقل عن مليون كيلو وات في سنة 1965.

وتبنى تشكوسلوفاكيا محطة تستخدم فيها اليورانيوم الطبيعي كوقود والماء الثقيل كمهدئ وثاني أكسيد الكربون كمبرد. وتتجه الجمهورية العربية المتحدة لبناء مفاعل قوي قدرته نحو 100 مليون وات معتمدة على الخبرة العالمية المكتسبة ؛لتدخل ميدان القوة النووية نظراً لاحتياجها إلى هذا النوع من المحطات النووية ،علاوة على المحطات العادية التي تبنيها لتسد احتياجات الصناعة المتزايدة.

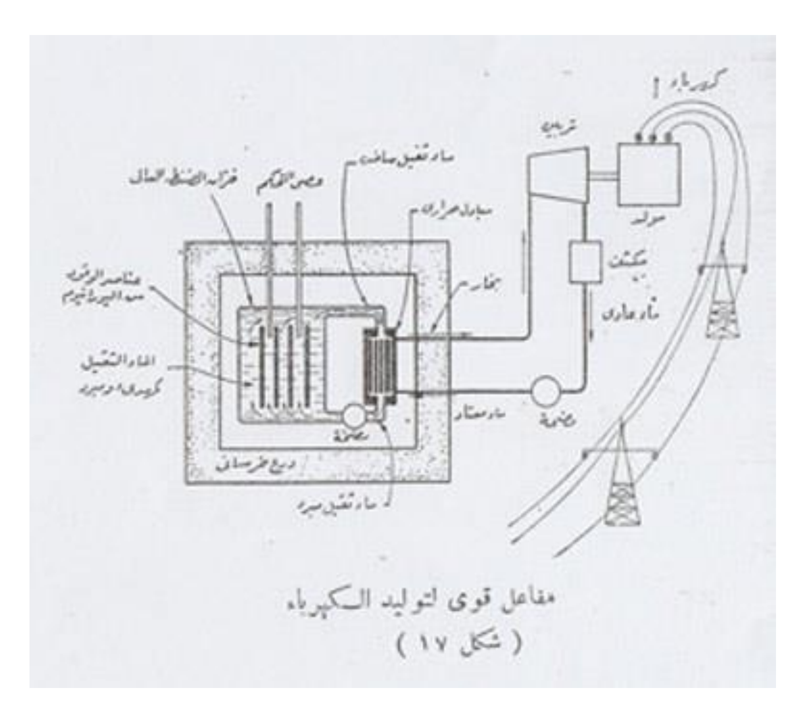
وصف مفاعل القوى:

يمر المبرد على وقود المفاعل فترتفع درجة حرارته، وهذه الحرارة المكتسبة تستخدم في تسخين الماء المعتاد الذي يمر في مبادل حرارى فيتبخر ويدير تربينات تولد الكهرباء فكل ما يستفاد منه في هذه الحالة من المفاعل هو الحرارة ،كما في شكل (17) وفيه توضع عناصر الوقود من اليورانيوم في المهدئ، وهو يتكون من الماء الثقيل ويعمل في نفس الوقت مبرداً فترتفع درجة حرارته ويمر إلى المبادل الحراري ؛حيث تنزع منه حرارته وتستخدم

في تسخين كمية الماء المارة في المبادل المعتاد الذي يمر في المبادل ؛فيتحول إلى بخار بعد ارتفاع درجة حرارته ويمر إلى تربين يدير مولد الكهرباء ثم يعود إلى المكثف ثم إلى المضخة وإلى المبادل مرة أخرى وبهذه الطريقة تتكون الكهرباء.

مفاعلات القوى لخدمة الأغراض المختلفة:

لا يقتصر استعمال مفاعلات القوى على توليد الكهرباء فهي تستخدم في تسيير الغواصات ومن بينها تونيلوس الأمريكية ،وهي أول غواصة سارت بالطاقة النووية والسفينة لنين محطمة الجليد الروسية وحمولتها 16.000 طن، وسافانا وهي سفينة تجارية أمريكية حمولتها 821.000 طن يستخدم فيها مفاعل قدرته الحرارية 68 مليون وات.



مفاعل قوى لتوليد الكهرباء
(شكل ١٧)

وليس تسيير السفن والغواصات بالطاقة النووية اقتصادياً ولكن ما تحتويه من مميزات قد يبرر تضحية الناحية الاقتصادية في سبيلها، فالغواصات مثلاً، يبيح تسييرها بالوقود النووي بقاءها معمورة تحت سطح الماء مدة أطول، فقد نجحت الغواصة نوتيلوس في المرور تحت جليد القطب الشمالي والسبب في نجاحها هو الوقود النووي، كذلك تحتاج محطمات الجليد إلى الاكتفاء الذاتي وتقدر قدرته بنحو سنة تقريباً.

ويمكن كذلك استخدام مفاعلات القوى للتدفئة، كما يتضح في مشروع المفاعلات في استكهولم وزيورخ.

الاندماج النووى:

حين تندمج بعض نوى نظائر الأيدروجين مثل الديوترون أو التريتون مكونة نواة الهيليوم تنبعث طاقة كبيرة ،ومثل هذا التفاعل الاندماجي يحدث في الشمس والنجوم المضيئة بذاتها ويستلزم حدوث هذا الاندماج ارتفاعاً كبيراً في درجة الحرارة ،وقد أمكن إحداثه في القنبلة الأيدروجينية ولكن الطاقة الاندماجية لم تستأنس بعد، ولم يستطع الإنسان أن يسيطر عليها كما استطاع السيطرة على الطاقة الانشطارية بالتحكم فيها وتوليد الكهرباء منها، ويرجع إذاعة سر البحوث في هذا الموضوع إلى سنة 1956 حين ألقى العالم السوفيتي كورتشاتوف في هيئة الطاقة الذرية البريطانية بهارول محاضرة أشار فيها إلى التفاعل الاندماجي الناشئ من رفع درجة الحرارة لمواد الاندماج.

ويحدث هذه الاندماج إذا إتحد ديوترونان وتتكون من إتحادهما نواة الهيليوم 3 وينطلق نترون أو يتكون تريتون وينطلق بروتون، أما إذا حدث الاندماج بين تريتونين فينطلق نترون ويتكون الهليوم 4، وفي كل هذه التفاعلات تكون كتلة النواتج أصغر من كتلة النوى الداخلة في التفاعل وفرق الكتلة يتحول إلى طاقة تفوق طاقة انشطار اليورانيوم، ولذا ازداد اهتمام العالم بالاندماج وطاقته، فضلاً عن أن معين هذه الطاقة لا ينضب إذ يعتمد على الماء، كما أن هذه الطاقة خالية من المشاكل المعقدة للمخلفات المشعة التي هي مشكلة المشاكل بالنسبة للطاقة الانشطارية.

ضرورة ارتفاع درجة الحرارة لإحداث الاندماج:

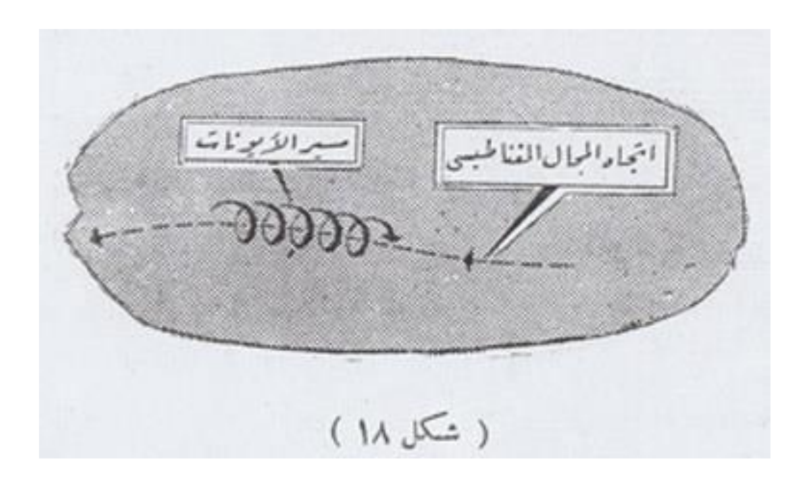
ولأجل أن يحدث هذا الاندماج وجب أن ترتفع درجة حرارة المواد الداخلة في التفاعل (الديوترونات والتريتونات الموجبة الشحنة) ارتفاعاً كبيراً إلى أن تصبح الجسيمات في حالة أشبه بالغازية تتحرك بسرعة كبيرة حتى تتصادم بعضها مع بعض وتتقارب لدرجة تسمح بحدوث الاندماج ،وتقدر درجة الحرارة هذه بمئات الملايين من الدرجات، فاندماج الديوتريونات يقتضى أن تصل درجة الحرارة إلى 500 مليون درجة، واندماج الديوتريوم بالتريتيوم يقتضى الوصول إلى درجة 250 مليون، وفي هذه الحالة تتفكك ذرات الديوترونات والتريتونات بحيث تتجرد النوى عن الإلكترونات وتصبح لدينا أيونات موجبة وإلكترونات سالبة ،وتسمى المادة في هذه الحالة بالبلازما وكأنها حالة رابعة من أحوال المادة

تغاير أحوالها الثلاثة المعروفة، إن كان لها مثال مما هو حادث في الشمس وفي النجوم فلم يكن لها من مثل شبيه أو نظير من الظواهر التي تحدث على سطح الأرض.

الوعاء المغناطيسي:

ولما كان يلزم رفع درجة حرارة البلازما إلى ملايين الدرجات حتى يتسنى حدوث الاندماج، فأي وعاء إذن يمكن أن يحتمل هذه الدرجة العالية التي تبلغ مائة أو مائتي مليون من الدرجات، لا شك أن الوعاء المادي مهما كانت المصنوع منها لا يمكن استخدامه؛ لأنه سوف يعمل على تبريد البلازما ،وسوف تعمل درجة حرارة البلازما على صهر الوعاء وتبخيره فلا مناص إذن من استخدام وعاء من غير مادة– مجرد مجال مغناطيسي شدته نحو 100.000 جاوس هذا هو الوعاء الذي يستطيع أن يحفظ البلازما بما فيها من إلكترونات وأيونات، ولكن المجال المغناطيسي ليس وعاء تاماً ،فجسيمات البلازما سوف تصطدم بعضها ببعض وكلما حدث مثل هذا التصادم ارتدت الجسيمات عن المجال المغناطيسي بمقدار صغير يساوي حجم دائرة الجسيم ،وبعد عدة تصادمات يستطيع الجسيم أن يتسرب إلى الوعاء المادي ولكن الوعاء المغناطيسي إذا كان قوياً فإن مثل هذا التسرب لا يعتد به، كما أن الجسيمات المشحونة نفسها يتولد بسببها مجال مغناطيسي ومجال كهربائي قد تعمل على زحزحة البلازما عن الوعاء المغناطيسي، وتتحرك الأيونات في دائرة عمودية على اتجاه

خطوط القوى المغناطيسية ولذا تدور في حركة حلزونية كما في (شكل **18**).



(شكل ١٨)

وإذا فرض أن البلازما تتكون داخل أنبوبة إسطوانية أو أنبوبة على شكل حلقة مستديرة وجعل من حول الإناء ملف لولبي يمر فيه تيار كهربائي ،فإن البلازما تنكمش عند محور الملف بعيدة عن جدران الإناء بفعل المجال المغناطيسي.

ظاهرة القرص:

ويمكن إنتاج البلازما بوضع الديوتيريوم في أنبوبة تفريغ كهربية، وعندما ينطلق التيار الكهربائي داخل الأنبوبة يسخن الديونيروم وتتفكك الإلكترونات والنوى ،وتتقلص ذرات الغاز في عمود صغير ،ويحدث هذا التقلص نتيجة للمجال المغناطيسي الناشئ من مرور الكهرباء في الغاز فتنعصر البلازما في عمود رفيع وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة القرص (**Pinch effect**) ،وكان من المعتقد أن هذا الفرص وسيلة مجدية

لتحديد البلازما اللازمة للاندماج، وقد لاحظ الدكتور بيكر من بركلي بأمريكا هذه الظاهرة في سنة 1948 في تجربة لم يكن هدفها الاندماج النووى، وقد بدأ الدكتور "بيكر" وآخرون في بحوث على هذه الظاهرة في سنة 1952 مستهدفين بذلك الإفادة منها في الاندماج النووى ولاحظ ظور نيوترونات ،ودرس الموضوع تفصيلاً وعرف السبب في خروج النيوترونات، وأوضحت التجربة أن القرص المغناطيسي البسيط ليس وسيلة ممكنة للحصول على القوى الاندماجية.

وسائل رفع درجة الحرارة:

يمكن رفع درجة حرارة البلازما بواسطة المجال الكهربائي والبلازما تتكون في هذه الحالة بواسطة تأيين الغازات في القارورة المغناطيسية، إذا مر المجال الكهربائي موازياً للمجال المغناطيسي ويسمى التسخين بهذه الطريقة بالتسخين الأومي ،ويمكن توليد المجال الكهربي بجعل البلازما دائرة ثانوية في محول كهربائي نابض، وهذه الطريقة تصلح لرفع درجة الحرارة أكثر من مليون درجة ،ويمكن كذلك تسخين البلازما بفعل مجال مغناطيسي متذبذب ،وتسمى هذه العملية بالضخ المغناطيسي، ويشبه هذا الفعل بفعل المكبس في المضخة المعتادة ،ويمكن التسخين بفعل الاهتزازات الكهربائية ذات التردد العالي حيث تحدث هذه الاهتزازات تيارات تأثيرية يحدث من جرائها التسخين.

زمن الاحتواء:

ويعتمد الزمن الذي يلزم أن تبقى خلاله البلازما إلى أن يحدث الاندماج على كثافة البلازما، ويصل هذا الزمن إلى ثانية أو أكثر إذا وصلت كثافة البلازما إلى النهاية العظمى التي يمكن للمجال المغناطيسي أن يمسكها، وبمعنى آخر فإن المفاعل الاندماجي الناجح يلزم أن يحتوى البلازما لمدة ثانية أو أكثر.

ويمكن تقصير زمن الاحتواء ليسمح بالاندماج إذا زيد المجال المغناطيسي كثيراً عن **100.000** جاوس.

الصعوبات أمام تحقيق الطاقة الاندماجية:

أهم مشكلة تواجه الطاقة الاندماجية هي مشكلة الوعاء ،فكل المواد المعروفة تتبخر عند درجة حرارة البلازما ،والقارورة المغناطيسية هي الوسيلة لتعليق البلازما داخل الوعاء المادي ومنعها من الهروب إليه، وتواجه هذه القارورة المغناطيسية مشكلة عدم استقرار البلازما نفسها ،والسبب في عدم الاستقرار هذا لازال غامضاً، هل يرجع إلى طبيعة البلازما نفسها أو لسبب المجالات المغناطيسية والكهربائية المستخدمة؟

وإذا أمكن التغلب على هذه الصعوبة فسوف تنتج مشكلات أخرى هندسية وتكنولوجية ومشكلة الحصول على مواد تقوى على تحمل درجات الحرارة العالية مدداً أطول ،ومشكلة الوسائل الآلية التي يلزم توفرها للعمل من بعيد.

أما الحصول على مجال مغناطيسي كبير فلم يعد مشكلة حيث المقدار المطلوب هو 100.000 جاوس وقد تمكن العالم الروسي "كابيتزا" من الوصول إلى 400.000 جاوس حينما كان يعمل في انجلترا.

صعوبة أخرى عند دراسة التفاعلات النووية الحرارية هي ما يسمونه ب"التشخيص" وهو معرفة ما يجرى في البلازما ؛فعند درجات الحرارة العالية لا تشع البلازما ضوءاً ،وبذا يتعذر الاكتشاف والتشخيص بالطرق العادية ولكن البلازما تشع أمواجاً غاية في القصر ؛مما يستلزم استخدام وسائل هذه الأمواج في دراسة البلازما فتبعث شعاعاً من أمواج متناهية القصر داخل البلازما ،وعندما يخرج الشعاع من الجهة الأخرى يكون مشوهاً ودرجة التشويه تبين لنا ما يحدث داخل البلازما.

ولكن الأمل كبير في التغلب على الصعوبات والحصول على طاقة أكبر حجماً من الطاقة الانشطارية ؛حيث المواد الأولية موجودة وتكفى العالم ألف مليون سنة فالديوتيريوم يمثل جزءاً من ستة آلاف من مياه الأرض.

الفهرس